

Jari Lindblad¹, Harri Kilpeläinen¹ ja Juha Heikkinen²

Hakkuukonemittauksen tyvifunktio männyn tyviosan tilavuuden määrittämisessä

Lindblad J., Kilpeläinen H., Heikkinen J. (2018). Hakkuukonemittauksen tyvifunktio männyn tyviosan tilavuuden määrittämisessä. Metsätieteen aikakauskirja 2018-7805. Tutkimusartikkeli. 26 s. <https://doi.org/10.14214/ma.7805>

Tiivistelmä

Hakkuukonemittauksessa tyvipölkkyjen tyviosan läpimitat määritetään laskennallisesti puulaji-kohtaisilla tyvifunktioilla. Tyviosalla tarkoitetaan 1,3 metrin pituista rungonosaa kaatosahauksesta lähtien. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tarkastaa ja tarvittaessa korjata hakkuukonemittauksessa käytettävä männyn tyvifunktio. Tutkimukseen valittiin 33 eri puolella Suomea sijaitsevaa mäntymetsikköä, joista valittiin 825 koepuuta. Koepuiden mittauksia tehtiin metsässä, ja hakuiden jälkeen koepuiden tyvipölkkyille tehtiin mittauksia kuudella eri tehtaalla. Koetyvipölkkyjen tyviosien vertailutilavuudet määritettiin upotusmittauksella. Tyvifunktioissa tyviosan suhteellinen muoto muuttuu tyvipölkyn järeyden, siis 130 senttimetrin etäisyydeltä kaatosahauksesta mitatun läpimitan, mukaan. Tässä tutkimuksessa tyvifunktio tuotti pienillä puilla suurempia, ja suurilla puilla pienempiä läpimittoja koepuiden tyviosista saksimittauksella mitattuihin läpimittoihin verrattuna. Koetyvipölkkyaineistossa tyviosan suhteellinen muoto ei muuttunut pölkkyjen järeyden mukaan, vaan oli likimäärin vakio. Tyvifunktion korjaus muodostui kahdesta vaiheesta, niin sanotuista oikaisukorjauksesta ja tasokorjauksesta. Tyvifunktion oikaisukorjaus tehtiin koepuiden tyviosista saksimittauksella mitattujen läpimitta-aineistojen perusteella. Näin korjatun tyvifunktion perusteella määritetyt koetyvipölkkyjen tyviosan tilavuudet olivat noin viisi prosenttia tyviosien upotustilavuuksia suurempia kaikilla järeyksillä. Edelleen tyvifunktiolle tehtiin tasokorjaus siten, että tyvifunktion perusteella määritetyt tyviosan tilavuudet vastasivat upotustilavuutta. Tyvifunktion korjauksen vaikutus sillä määritettyyn tyviosan tilavuuteen oli pienillä noin 50 litran rungoilla (rinnankorkeusläpimitta noin 10 senttimetriä) noin -8,5 prosenttia ja suurilla noin 1750 litran rungoilla (rinnankorkeusläpimitta noin 45 senttimetriä) noin -2,9 prosenttia. Kun tyvifunktion korjaus suhteutetaan koko rungon tilavuuksiin, olivat vastaavat osuudet noin -2,3 ja -0,4 prosenttia. Kun korjaus suhteutetaan Suomen kokonaishakkuukertymääräarvioissa esitettyihin järeyksiluokkien osuuksiin, on kokonaisvaikutus suuntaa-antavasti noin yhden prosentin vähennys männyn kokonaistilavuudessa.

Avainsanat mittausslaki; hakkuukonemittaus; puutavaranmittaus; mitta; runkokäyrä; tyvifunktio
Yhteystiedot ¹Luonnonvarakeskus (Luke), Tuotantjärjestelmät, Joensuu; ²Luonnonvarakeskus (Luke), Soveltava tilastotiede, Helsinki

Sähköposti jari.lindblad@luke.fi

Hyväksytty 05.10.2018

1 Johdanto

1.1 Tausta

Hakkuukonemittaus on puutavaranmittauksen valtamenetelmä. Hakkuukonemittauksen osuus kotimaisten markkinahakkuuiden luovutusmittauksessa oli noin 77 prosenttia vuonna 2017. Pystykaupoissa hakkuukonemittauksen osuus oli selvästi yli 80 prosenttia (Melkas 2018). Koneellisen puunkorjuun urakoinnin maksuperusteena käytetään lähes pelkästään hakkuukonemittausta (asiantuntija Ville Manner, Koneyrittäjät, suullinen tiedonanto 2015).

Hakkuukonemittauksessa rungon läpimittoja ja pituutta mitataan jatkuvasti rungon karsinnan aikana. Tyypillisesti läpimittoja rekisteröidään rungon pituussuunnassa yhden senttimetrin välein. Teknisesti läpimittojen mittaus toteutetaan rungon pinnan mekaanisella tunnustelulla joko hakkuupään karsintaterillä tai syöttörullilla. Läpimitan mittauksessa siis rekisteröidään karsintaterien tai syöttörullien avaumaa.

Hakkuupään mittausperiaatteen vuoksi läpimittoja ei pystytä mittaamaan rungon tyviosassa kaatosahauksesta lähtien. Tyviosan läpimittojen laskennassa käytetään puulajikohtaista tyvifunktiota, jonka syöttöarvona käytetään aina rungon 130 senttimetrin etäisyydeltä kaatosahauksesta mitattua läpimittaa. Siten hakkuukoneella mitatuista (130 senttimetrin mittauskohdan jälkeen) ja tyvifunktiolla lasketuista (130 senttimetrin etäisyydelle kaatosahauksesta) läpimitoista muodostetaan yhtenäinen runkokäyrä koko rungon käyttöosalle. Muodostetun runkokäyrän perusteella käyttöosan ja sen osien tilavuudet lasketaan pätkittäin katkaistun kartion tai sylinterin tilavuuksina. Tyviosalla siis tarkoitetaan tässä 130 senttimetrin pituista rungonosaa kaatosahauksesta lähtien.

Aiemmin käytäntönä oli se, että tyviosan läpimitat määritettiin hakkuukonevalmistajien omilla laskentamenetelmillä. Vuonna 2006 tyviosan läpimittojen laskennassa siirryttiin käyttämään yhtäläisiä puulajikohtaisia tyvifunktioita. Silloisen mittauslainsäädännön perusteella tyvifunktiot annettiin MMM:n asetuksella. Asetuksen ja tyvifunktioiden taustalla olivat Metsäntutkimuslaitoksen (nyk. osa Luonnonvarakeskusta) ja Metsäteho Oy:n tekemät laskelmat ja tyvifunktion muodostaminen.

Käytännön puutavaranmittauksessa oli tyvifunktioiden käyttöönoton jälkeen havaittu, että männyn tyvipölkkyillä metsässä hakkuukoneella mitatut tilavuudet olisivat jatkuvasti ja selvästi suurempia kuin tehtaalla mitatut tilavuudet. Eroja pidettiin tasoltaan sellaisina, että ne eivät selittyisi normaaleilla puunkorjuun ja -kuljetusten hävikeillä. Yhtenä mahdollisena syynä erolle pidettiin käytössä olevaa tyvifunktiota.

Metsäntutkimuslaitoksen lausunnossa (Metsäntutkimuslaitos 2012) tarkasteltiin laajoja puutavaran vastaanoton yhteydessä tukkimittarilla mitattuja tyvitukkiaineistoja. Tämän lisäksi kerättiin erillinen tutkimusaineisto, jossa koetyvitukit valittiin koeimikoilta ja kantojen korkeudet todennettiin. Lausuntoa varten analysoitujen aineistojen perusteella ei voitu arvioida, että tyvifunktioiden perusteella laskettujen tyvitukkien tyviosien tilavuudet olisivat virheellisiä. Lausunnossa ei kuitenkaan pystytty kattavasti määrittämään syytä laajassa tukkiaineistossa havaitulle tukkimittauksen ja tyvifunktioiden käyttöön perustuvan mittauksen tilavuuserolle.

Metsäntutkimuslaitos toteutti syksyllä 2013 kenttäkokeen ja esitutkimuksen (Lindblad ym. 2013), jossa tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa koetyvipölkkyjen tyviosien mittausmenetelmä (vertailumenetelmä), joka vastaa todellisen kuorellisen tilavuuden määritelmää ja joka tuottaa tyviosan tilavuudelle oikeana pidettävän vertailuarvon. Vertailumenetelmänä käytettiin upotusmittausta. Pienessä 113 mäntytyvipölkyn esitutkimusaineistossa tyviosan tyvifunktion perusteella määritetty tilavuus oli keskimäärin noin kahdeksan prosenttia suurempi kuin upotustilavuus. Tulos antoi viitteen siitä, että tyvifunktioissa olisi korjaustarvetta. Rungon tyven muodon ja sen vaihtelun vaikutus

hakkuukonemittauksen tuloksiin on todettu myös varhaisemmissa tutkimuksissa (esim. Ala-Ilomäki 1993; Ahonen ja Marjomaa 1994; Gjerdrum ja Nitteberg 2001; Möller ja Arlinger 2007).

1.2 Tyvifunktion ominaisuudet

Tyvifunktioita laadittaessa Metsäntutkimuslaitos määrittä (vuosi 2003) puulajikohtaiset runkokäyrät, joissa perustana käytettiin Valtakunnan metsien inventoinnin (VMI) koepuiden mittaus-tietoja ja Laasasenahon (1982) runkokäyrämalleja. Runkokäyristä tuotettiin kuusi vaihtoehtoista tyviprofiilitaulukkoa, jotka erosivat toisistaan oletetun kannonkorkeuden suhteen. Tyvekkäim-mässä vaihtoehdossa kaatosahaus oletettiin tehtävän viisi senttimetriä juurenniskan alapuolelta ja sylinterimäisimmässä vaihtoehdossa kahdeksan senttimetriä juurenniskan yläpuolelta. Metsäteho Oy vertasi tyviprofiilitaulukoita erilliseen kenttäkoeaineistoon. Tyviprofiilitaulukoiden vaihto-ehdoista sylinterimäisin vastasi parhaiten kenttäkoeaineiston koetyvipölkkyjen muotoa. Tämän tyviprofiilitaulukon perusteella Metsäteho Oy:ssa laadittiin tyvifunktio.

Laasasenahon (1982) vakioparametrisessa runkokäyrämallissa yhtenä perusominaisuutena on se, että puun suhteellinen muoto oletetaan riippumattomaksi järeydestä. Tämä tarkoittaa muun muassa sitä, että erikokoisten puiden samoilta *suhteellisilta* korkeuksilta määritettyjen läpimittojen suhde on vakio. Edelleen tästä voidaan johtaa, että erikokoisen puiden samoilta absoluuttisilta korkeuksilta määritettyjen läpimittojen suhde ei ole vakio.

Tyvifunktioissa *tyviosan* suhteellinen muoto muuttuu tyvipölkyn 130 senttimetrin etäisyydeltä kaatosahauksesta mitatun läpimitan (D_{130}) mukaan. Tyvifunktion esittämistavan kannalta tämä tarkoittaa sitä, että varsinaisen tyvifunktion (kaava 1) parametreja määritetään puulajikohtaisilla malleilla (kaavat 2–4), joissa selittäjänä on tyvipölkyn D_{130} -läpimitta.

Hakkuukonemittauksessa tyvipölkyn tyviosan läpimittojen määrittämisessä käytettävä tyvi-funktio on muotoa (Metsäntutkimuslaitos 2013):

$$D_L = \left[1 + \left(a_0 \times (1,3 - L) + a_1 \times (1,3 - L)^{a_2} \right) / 100 \right] \times D_{130}, \quad (1)$$

joissa:

D_L = läpimitta etäisyydellä L kaatoleikkauksesta, cm,

a_0 .. a_2 = puulajikohtaiset parametrit, joiden arvot saadaan kaavoilla 2–4,

L = etäisyys kaatoleikkauksesta, m,

D_{130} = läpimitta 1,3 metrin etäisyydellä kaatoleikkauksesta, cm.

Tyvifunktion parametrien (a_0 .. a_2) arvot määritetään puulajikohtaisilla kaavoilla. Parametreja tuottavat kaavat ovat muotoa:

$$a_0 = a_{00} + a_{01} \times D_{130} + a_{02} \times D_{130}^2 + a_{03} \times D_{130}^3 + a_{04} \times D_{130}^4, \quad (2)$$

$$a_1 = a_{10} + a_{11} \times D_{130} + a_{12} \times D_{130}^2 + a_{13} \times D_{130}^3 \text{ ja} \quad (3)$$

$$a_2 = a_{20} + a_{21} \times D_{130} + a_{22} \times D_{130}^2, \quad (4)$$

joissa:

D_{130} = läpimitta 1,3 metrin etäisyydellä kaatoleikkauksesta, cm,

a_{00} .. a_{22} = puulajikohtaiset parametrit.

1.3 Tavoite

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tarkastaa, määrittää korjaustarve ja tarvittaessa korjata hakkuukonemittauksessa käytettävä männyn tyvifunktio.

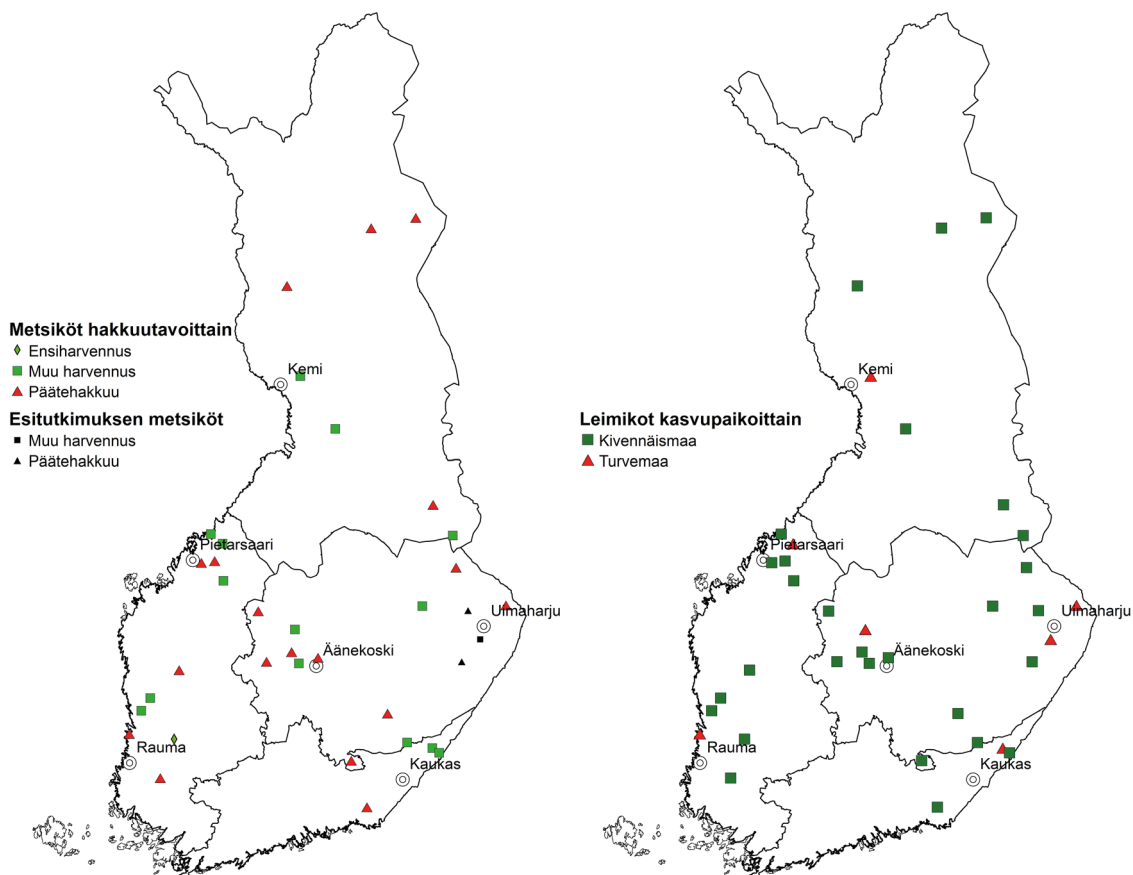
Tavoitteen edellyttämät tärkeimmät tehtävät olivat:

- hankkia maantieteellisesti kattava, hakattavia metsiköitä edustava ja läpimittajakaumaltaan riittävän laaja männyn koepuu- ja koetyvipölkkyaineisto,
- toteuttaa koetyvipölkkyjen mittaukset tehtaiden mittauspaikeilla,
- määrittää tyvifunktion ja vertailuarvon ero maantieteellisen alueen, metsikkötyyppien ja järeyden suhteen ja
- korjata (tarvittaessa) männyn tyvifunktio tarkoituksenmukaisella tavalla siten, että se tuottaa todenmukaisia tyviosan tilavuuksia.

2 Aineistot ja menetelmät

2.1 Koemetsiköt

Koemetsiköt valittiin korjuuseen tulevista leimikoista kuuden tehtaan puunhankinta-alueilta eri puolilta Suomea (kuva 1). Kukin koemetsikkö vastasi leimikon yksittäistä metsikkökuviota. Koemetsiköiden valinta tehtiin osittain harkinnanvaraisesti siten, että ne vastasivat metsikön rakenteen



Kuva 1. Koemetsiköiden sijainnit hakkuutavoittain (vasemmalla) ja maaperän mukaan (oikealla). Vasemman puoleiseen karttakuvaan on merkitty kolme esitutkimusmetsikköä Pohjois-Karjalassa.

Taulukko 1. Koemetsiköiden määrät hakkuutavan, maaperän ja tehtaan mukaan.

	Uimaharju	Kemi	Äänekoski	Rauma	Kaukas	Pietarsaari	Yhteensä
Hakkuutapa							
uudistushakkuut	3	3	4	3	3	2	18
harvennushakkuut	2	2	2	3	3	3	15
Maaperä							
kivennäismaat	4	4	5	5	5	4	27
turvemaat	1	1	1	1	1	1	6
Koko aineisto	5	5	6	6	6	5	33

ja puuston laadun suhteen normaalia puunhankintaa. Puuston tiheydeltään poikkeuksellisen harvoja tai tiheitä, puustoltaan tyvimutkaisia tai oksikkaita tai maapohjaltaan kivisiä metsiköitä ei otettu koemetsiköiksi.

Koemetsiköiden kokonaismäärä oli 33, joista uudistushakkuumetsiköitä oli 18 ja harvennushakkuumetsiköitä 15. 27 koemetsikköä sijaitsi kivennäismaiden tuoreilla ja kuivahkoilla kankailla ja kuusi metsikköä turvemailla, joissa turpeen paksuus ylitti 30 senttimetriä (taulukko 1, kuva 1).

Kenttätöiden yhteydessä koemetsiköistä määritettiin metsikön ikä, pohjapinta-ala ja kasvu-paikkatyypit. Metsikön ikä määritettiin tarvittaessa kasvukairalla 1–2 koepuusta otetuista näytteistä. Pohjapinta-alan mittaus tehtiin kaikilla koelohjoilla koepuiden valinnan yhteydessä.

2.2 Koepuiden valinta

Koemetsiköihin asetettiin mahdollisimman pitkä linja, jolle sijoitettiin tasaisin välein viisi relaskoop-pikoealaa. Koealaväli oli kuitenkin aina vähintään 30 metriä ja koealan etäisyys kuvion reunasta vähintään 20 metriä. Jos kuvion koko ja linjan pituus ei mahdollistanut näitä etäisyyksiä, valittiin toinen linja, jolle osa koelohjoista sijoitettiin.

Jokaiselta koealalta valittiin viisi koepuuta, jolloin koepuiden kokonaismäärä yhdessä koemetsikössä oli 25. Koepuiksi valittiin rinnankorkeusläpimitaltaan ($d_{1,3}$ syntypisteestä lähtien) yli kymmenen senttimetrin mäntyrunkoja. Koepuut kiintiöitiin viiteen rinnankorkeusläpimittaluokkaan. Läpimittaluokkien ($d_{1,3}$) rajat uudistushakkuilla olivat alle 20, 20–25, 25–30, 30–35 ja yli 35 senttimetriä ja harvennushakkuilla 10–13, 13–16, 16–19, 19–22 ja yli 22 senttimetriä.

Koepuiden valinta tehtiin relaskooppiotannalla linjan kulkusuunnasta alkaen. Koepuiksi valittiin kustakin läpimittaluokasta ($d_{1,3}$) ensimmäinen relaskooppiotokseen (relaskooppikerroin 2) sisältyvä puu. Koepuiksi ei kuitenkaan valittu relaskooppiotannalla valituksi tullutta puuta, jossa oli voimakas tyvimutka, selvä piparkakkutyvi tai vastaava vika, joka vaikeuttaisi luotettavaa mitausten tekemistä ja voisi edellyttää tyvileikkojen tekemistä hakkuussa. Tällöin valittiin relaskooppiotoksen seuraava puu. Jos johonkin läpimittaluokkaan ei saatu koepuuta, tehtiin uusi otanta relaskooppi-kertoimella 1. Jos edelleenkin ei saatu koepuuta, valittiin koepuu toisesta läpimittaluokasta ja täydennettiin vajaa läpimittaluokka seuraavilla koelohjoilla. Jos täydennys ei esimerkiksi metsikön rakenteen vuoksi onnistunut, valittiin mahdollisimman tasaisesti muiden läpimittaluokkien koepuita siten, että kokonaismäärä 25 täyttyi.

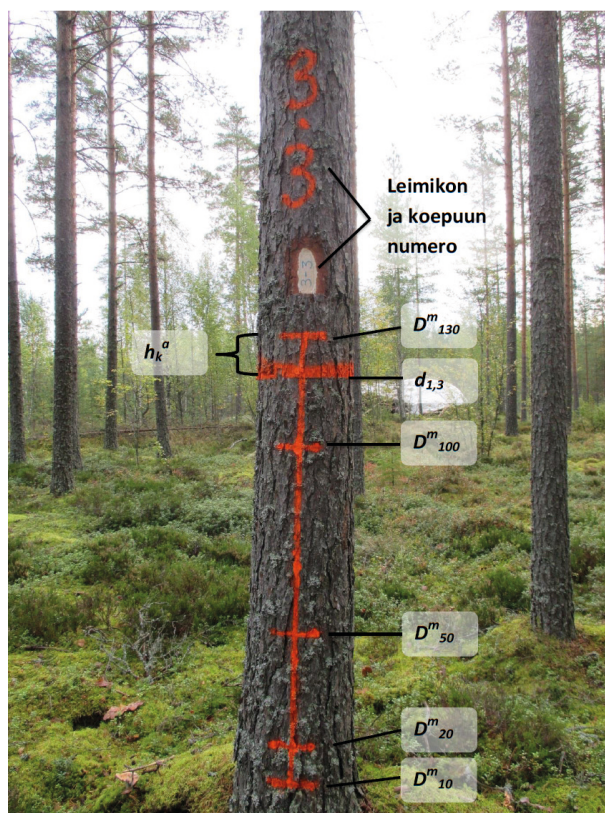
2.3 Koepuiden mittaukset

Koepuihin maalattiin maalipanta ympäri rungon 130 senttimetrin korkeudelle syntypisteestä ($d_{1,3}$). Maalipannan perusteella määritettiin myöhemmin tehtaalla tehtävissä mittauksissa koepuiden hakkuussa toteutunut kannonkorkeus (h_k^t).

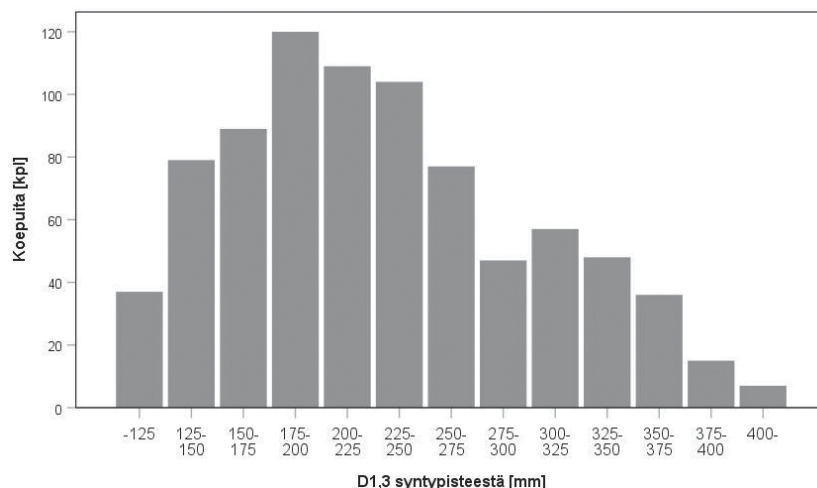
Koepuista mitattiin syntypisteestä lähtien rinnankorkeusläpimitta ($d_{1,3}$), yläläpimitta (d_6) ja pituus (h). Rinnankorkeusläpimitat mitattiin koealan säteen suunnassa mittasaksilla. Yläläpimittojen mittauksessa käytettiin pääsääntöisesti mittasaksia (erottelukyky yksi millimetri) ja osassa koemetsiköistä mittakaulainta (erottelukyky yksi senttimetri). Koepuiden pituudet mitattiin optisilla Vertex-mittauslaitteilla, joiden erottelukyky on yksi desimetri.

Koepuista mitattiin yhdestä suunnasta läpimitat 10, 20, 50, 100 ja 130 cm korkeuksilta (jatkossa D^m_{10} , D^m_{20} , D^m_{50} , D^m_{100} ja D^m_{130}) arvioidusta kannonkorkeudesta (kuva 2). Arvioitu kannonkorkeus (h_k^a) oli se tasa, josta mittaaja arvioi koepuun kaatosahauksen tehtävän hakkuussa. Läpimittojen mittaussuunta oli samansuuntainen koealan säteen kanssa, jolloin eri koepuiden läpimitat mitattiin eri ilmansuunnissa. Läpimittojen mittaussuunta merkittiin maalaamalla runkoon mittaussuuntaa osoittava pystysuora viiva sille puolelle koepuun tyveä, johon mittasaksien varsi osui mitattaessa. Mittauskorkeudet merkittiin maalaamalla vaakasuorat viivat mittaussuuntaa osoittavan pystyviivan päälle. Näiden merkintöjen perusteella mittaukset voitiin uusia samoista mittauskohdista ja -suunnista tehtailla tehtävissä mittauksissa.

Koepuiden valinta (kohta 2.2) ja mittaukset tehtiin pääosin syys–lokakuussa 2014 ja pieneltä osin marras–joulukuussa 2014. Kaikkiaan mitattuja koepuita oli 825 kappaletta.



Kuva 2. Koepuiden mittauskohdat ja merkinnät. Koepuista mitattiin syntypisteestä lähtien rinnankorkeusläpimitta ($d_{1,3}$), yläläpimitta (d_6) ja pituus (h). Rinnankorkeusläpimitan ($d_{1,3}$), kohdalle maalatun maalipannan perusteella määritettiin tehtaalla koepuiden hakkuussa toteutunut kannonkorkeus (h_k^a). Koepuista mitattiin yhdestä suunnasta läpimitat 10, 20, 50, 100 ja 130 cm korkeuksilta (D^m_{10} , D^m_{20} , D^m_{50} , D^m_{100} ja D^m_{130}) arvioidusta kannonkorkeudesta (h_k^a). Arvioitu kannonkorkeus mitattiin tehtaalla, mutta koepuissa sen arvo vastasi läpimittojen $d_{1,3}$ ja D^m_{130} mittauskohtien eroa.

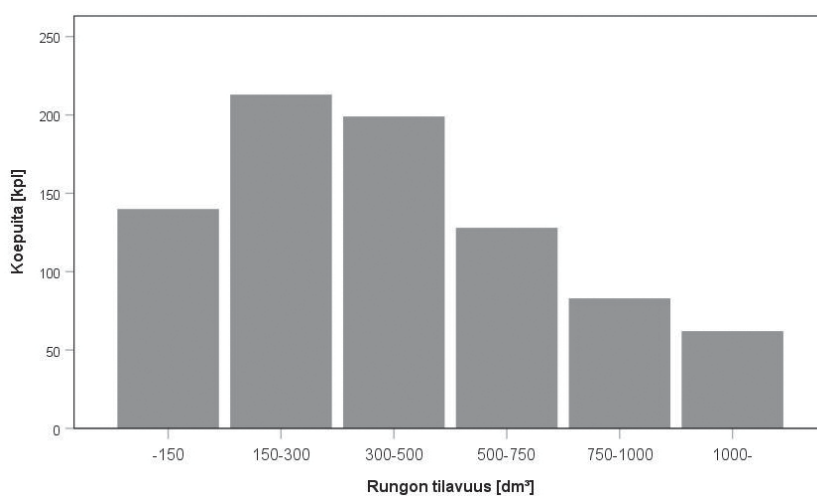


Kuva 3. Koeputien kappalemäärät rinnankorkeuslähimittaluokittain ($d_{1,3}$ syntypisteestä).

2.4 Koeputien järeys ja tilavuudet

Rinnankorkeuslähimitaltaan ($d_{1,3}$) pienin koeputa oli 101, ja suurin 481 millimetriä (kuva 3). Koeputien rinnankorkeuslähimitan jakauma ei vastannut koemetsiköiden järeysjakaumaa (runkolukusarja), sillä koeputien valinnassa jakaumaa pyrittiin suuntaamaan ja levittämään lähimittoja kiintiöimällä (kohta 2.2). Metsiköiden puuston järeysjakauma kuitenkin näkyi koeputien järeysjakaumassa siten, että pieniä ($d_{1,3} < 125$ mm) ja suuria ($d_{1,3} > 350$ mm) koeputia oli kohtalaisen vähän. Toisaalta rinnankorkeuslähimitaltaan 175–250 millimetrin koeputia oli paljon, mikä johtui osaltaan siitä, että harvennus- ja uudistushakkuumetsiköiden runkolukusarjat olivat tällä lähimittaluokalla selvästi päällekkäisiä; tätä pienemmät koeputat olivat pääsääntöisesti harvennushakkuumetsiköistä ja suuremmat uudistushakkuumetsiköistä.

Koko rungon tilavuudet (kuva 4) laskettiin määrittämällä koeputille runkokäyrät Laasasenahon (1982) männyn kolmen muuttujan ($d_{1,3}$, d_6 ja h) polynomimallilla. Koeputien tilavuuden laskennassa käytettiin metsässä arvioitua, oletettua kannonkorkeutta (h_k^a).



Kuva 4. Koeputien kappalemäärät rungon tilavuusluokittain. Rungon tilavuudet on laskettu runkokäyrämallien (Laasasenaho 1982) perusteella.

2.5 Koetyvipölkkyjen korjuu, kuljetus ja varastointi

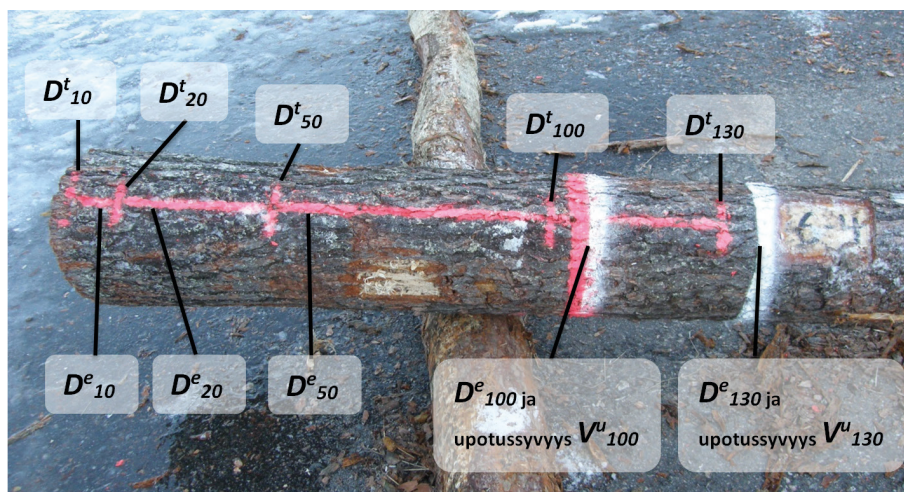
Koemetsiköissä tehtiin harvesterihakkuu, jossa pyrittiin mahdollisimman normaaliin työtapaan. Tutkimuksen tavoitteen kannalta oli tärkeää, että koepuiden kannonkorkeus vastasi tavallista harvesterihakkuun kannonkorkeutta. Koepuissa ei tehty tyveysiä, jotta koetyvipölkkyjen tyviosat olisivat kokonaisia rungon kaatosahauksesta lähtien.

Koepuiden hakkuussa käytettiin tavallisia, kyseisen leimikon hakkuussa käytettäviä puuta-varalajeja ja niiden mittoja. Koepölkkyiksi korjattiin ainoastaan koepuiden tyvipölkkyt. Koetyvipölkkyt pidettiin erillään metsäkuljetuksessa, tienvarastoinnissa ja kaukokuljetuksessa, ja varastoitiin tehtaiden puukentille koemetsikkökohtaisiin pinoihin. Pinot ja erityisesti koetyvipölkkyjen tyviosat peitettiin puukentällä varastoinnin ajaksi, jos oli olemassa lumisateen tai koetyvipölkkyjen jäätyneen mahdollisuus.

Koemetsiköiden hakkuut tehtiin pääosin loka–marraskuussa 2014 ja osin joulukuussa 2014. Joitakin koemetsiköitä hakattiin tammi–helmikuussa 2015. Tehtaiden mittauspaikoille toimitettiin 793 koetyvipölkkyä.

2.6 Koetyvipölkkyjen mittaukset tehtaalla

Koetyvipölkkyjen mittaukset tehtiin kuuden eri tehtaan mittauspaikoilla (taulukko 1). Koetyvipölkkyjen läpimitat mitattiin manuaalisesti käyttäen elektronisia mittasaksia (Masser Excaliper). Kunkin koetyvipölkyn mittaus toteutettiin siten, että 1) tyviosasta mitattiin läpimitat ristimittauksena 10, 20, 50 ja 100 senttimetrin etäisyyksiltä kaatosahauksesta (jatkossa D^e_{10} , D^e_{20} , D^e_{50} ja D^e_{100}), 2) 130 senttimetrin etäisyydeltä kaatosahauksesta mitattiin läpimita kuudesta mittaussuunnasta (jatkossa D^e_{130}) ja 3) tyviosan jälkeen mitattiin läpimitat ristimittauksena yhden metrin välein koepölkyn latvaan saakka (kuva 5). Läpimittamittaukset tehtiin todellisesta kaatosahauksesta lähtien ja niissä pyrittiin ehjäkuoriseen kuorelliseen läpimittaan.



Kuva 5. Koetyvipölkkyjen mittaukset tehtaalla. Läpimitat D^e_{10} , D^e_{20} , D^e_{50} ja D^e_{100} mitattiin ristimittauksena 10, 20, 50 ja 100 senttimetrin etäisyyksiltä pölkyn kaatosahauksesta ja läpimita D^e_{130} kuudesta mittaussuunnasta 130 senttimetrin etäisyydeltä kaatosahauksesta. Läpimitat D^t_{10} , D^t_{20} , D^t_{50} , D^t_{100} ja D^t_{130} mitattiin samoista mittauskohdista ja -suunnista kuin metsässä koepuiden tyviosista mitatut läpimitat ($D^m_{10}, \dots, D^m_{130}$, kuva 2). Upotusmittauksen upotussyvydet V^u_{100} ja V^u_{130} merkittiin maalilla.

Koepuiden tyviosien metsässä tehty (D^m_{10} , D^m_{20} , D^m_{50} , D^m_{100} ja D^m_{130}) läpimittojen mittausta (kohta 2.3) uusittiin tehtaalla koetyvipölkyille samoista mittauskohdista ja -suunnista (jatkossa D^t_{10} , D^t_{20} , D^t_{50} , D^t_{100} ja D^t_{130}) (kuva 5). Näiden mittausten perusteella pystyttiin määrittämään koetyvipölkkyjen läpimitan muutos metsän ja tehtaan välillä. Jos koepuun todellinen kannonkorkeus (h_k^t) oli selvästi korkeampi kuin arvioitu (h_k^a), ei tyviosan alimpien läpimittojen (D^t_{10} , D^t_{20}) mittausta luonnollisesti voitu tehdä. Läpimittojen ($D^t_{10}, \dots, D^t_{130}$) mittausta tehtiin mittaushetken todellisen läpimitan mittauksena, siis mittauksessa ei tehty kuorikorjauksia toisin kuin läpimittojen $D^e_{10}, \dots, D^e_{130}$ mittauksissa.

Koetyvipölkkyistä mitattiin metsässä rinnankorkeusläpimitan ($d_{l,3}$) kohdalle merkityn maali-pannan ja kaatosahauksen välinen etäisyys. Tämän perusteella laskettiin koepuiden todellinen kannonkorkeus (h_k^t). Lisäksi koetyvipölkkyistä mitattiin metsässä mitatun D^m_{50} -läpimitan mittauskohdan etäisyys kaatosahaukseen, minkä perusteella määritettiin metsässä arvioitun (h_k^a) ja hakkuussa toteutuneen (h_k^t) kannonkorkeuden ero, ja asemoitiin keskenään eri saksimittausten mittauskohdat.

Tilavuudet koepölkkyjen 100 ja 130 senttimetrin pituisille tyviosille määritettiin upotusmittauksella (jatkossa V^u_{100} ja V^u_{130}). Upotusmittaukset tehtiin tehtaiden kuitupuuotantaniippujen mittauksessa käytettävissä upotusaltaissa.

Ennen upotusmittauksia koetyvipölkkyihin merkittiin upotussyvyudet merkintämaalilla 100 ja 130 senttimetrin etäisyyksille hakkuussa toteutuneesta kaatosahauksesta (kuva 5). Upotusmittaus toteutettiin pölkkyittäin siten, että materiaalinkäsittelykoneen tai puutavara-auton kuormaimen kouraan kiinnitettiin nostovyöllä koukkuvaaka. Mitattavan koetyvipölkyn latvapäähän kiinnitettiin ketjut, jotka edelleen kiinnitettiin vaakaan. Koetyvipölkky upotettiin pystysuorassa siten, että ensimmäinen punnitus tehtiin tyviosan upotettuna 130 senttimetrin syvyyteen, toinen 100 senttimetrin syvyyteen ja kolmas punnitus tehtiin ilmassa. Mahdollinen kaarnan sisälle imeytynyt vesi sisältyi siten punnitustulokseen ilmassa. Tyviosien tilavuudet (V^u_{100} ja V^u_{130}) laskettiin soveltamalla Arkhimedeiden lakia.

Punnituksessa käytettiin koko kenttäkoeaineiston keruun aikana kolmea erityyppistä vaakaa ja viittä eri vaakalaitetta. Esitutkimuksesta (Lindblad ym. 2013) poiketen tässä tutkimuksessa käytettiin suurten pölkkyjen mittauksessa askelarvoltaan 0,2 kg:n vaakojen lisäksi myös 0,5 kg:n vaakaa. Vastaavasti pienillä ja osin myös keskisuurilla pölkkyillä käytettiin askelarvoltaan 0,1 kg:n vaakaa. Tyypiltään vaa'at olivat OCS 1000 kg/0,2kg (2 kpl), OCS-SF 300 kg/0,1 kg (2 kpl) ja Scaleshouse ECSS 2000kg/0,5 kg (1 kpl). Kaikki vaa'at otettiin tutkimuksen käyttöön uusina tai huollettuina ja tarkastettuina. Mittausten aikana vaakojen punnitustarkkuutta seurattiin tunnettujen testipunnusten punnituksilla. Koska testipunnukset eivät olleet kalibroituja, niitä ei käytetty vaakojen kalibrointiin, vaan ainoastaan vaakojen mittaustarkkuuden seuraamiseen ja mahdollisen mittauksen räjökinnän tai muun virheen havaitsemiseen.

2.7 Tyvifunktion korjaustarpeen määrittäminen

Tyvifunktion korjaustarpeen määrittäminen perustui oleellisesti tyvifunktioon perustuvan tyviosan tilavuuden ja vertailuarvon eron tarkasteluun. Tilavuuden vertailuarvona käytettiin tehtaalla koetyvipölkkyjen tyviosille mitattua upotustilavuutta (kohta 2.6). Määrittämisessä tuli ottaa huomioon se, että tyvifunktion käyttöön perustuvan mittauksen tulisi tuottaa todenmukainen tilavuus ehjäkuoriselle tyviosalle.

Koetyvipölkkyille määritettiin tyvifunktiolla tyviosan läpimitat D_L , kun L saa arvoja 0–130 senttimetriä (kaavat 1–4). Läpimittojen perusteella laskettiin koetyvipölkkyjen tyviosan tilavuudet viiden senttimetrin pituisissa osissa katkaistun kartion tilavuuksina. Matemaattisesti kysymyksessä on funktion pyörähdyskappaleen tilavuus määrätyn integraalin arvona, kun L on 0–130. Tyvifunktion määräämällä tilavuudella (V^f_{130}) tarkoitetaan jatkossa tyviosan tyvifunktiolla laskettujen tyviosan läpimittojen perusteella määritettyä tilavuutta.

Tyvifunktion syöttöarvona käytetään 130 senttimetrin etäisyydeltä kaatosahauksesta mitattua läpimittaa (D_{130}) (kaavat 1–4), jolloin oli kiinnitettävä erityistä huomiota koetyvipölkkyjen D_{130} -arvojen määrittämiseen. Koetyvipölkkyjen tyvifunktion syöttöarvoina käytettävät D_{130} -arvot määritettiin D^e_{130} ja D^t_{130} -arvojen (kohta 2.6, kuva 5) perusteella alla kuvatulla tavalla. Syynä tähän oli tutkimuksen mittausten suunnittelussa ja ohjeistuksessa tehty virhe tutkimuksen keskeisen tavoitteen kannalta. Läpimittojen D^e_{130} mittauksessa (kohta 2.6) pyrittiin ehjäkuoriseen kuorelliseen läpimitaan. Tällöin läpimitaan oli tarvittaessa voitu tehdä kuorilisäys. Läpimittojen (D_{130}) oli vastattava upotusmittauksen ajankohdan mukaista todellista läpimittaa.

Tyvifunktion syöttöarvona käytettävän D_{130} -läpimitan perustana pidettiin D^e_{130} -läpimittaa, joille tehtiin D^t_{130} -läpimitaan perustuva korjaus. Korjaus toteutettiin laatimalla malli, jolloin korjaus perustui suureen määrään mittaushavaintoja.

Kaavassa 5 on laskettu satunnaismuuttuja ΔD^{e-t}_{130} , joka on koetyvipölkkykohtainen estimaatti mittausten D^t_{130} ja D^e_{130} eroista, kun mittauskohtien korkeusero on otettu huomioon. Kysymyksessä ei siten ole läpimittojen (suureiden) D^t_{130} ja D^e_{130} mitattujen arvojen ero, vaan arvio suureiden määritelmään liittyvästä erosta. Laskennassa (kaava 5) läpimittojen mittauskohdat on laskennallisesti siirretty samaksi kannonkorkeuksien h_k^t ja h_k^a perusteella. Laskennassa pölkkyjen kapenemisena käytetty vakio (0,1 prosenttia/senttimetri) määritettiin mittausaineistosta läpimittojen D^e_{100} ja D^e_{150} perusteella.

$$\Delta D^{e-t}_{130} = D^e_{130} - D^t_{130} + (h_k^a - h_k^t) \times 0,001 \times D^e_{130} \quad (5)$$

, jossa:

ΔD^{e-t}_{130} = koetyvipölkkykohtainen estimaatti mittausten D^t_{130} ja D^e_{130} eroista, kun mittauskohtien korkeusero on otettu huomioon.

Muuttujalle ΔD^{e-t}_{130} laadittiin lineaarinen regressiomalli, jonka selittäjänä oli D^e_{130} -läpimitta. Lopulliset tyvifunktion syöttöarvoina käytettävät D_{130} -arvot muodostettiin vähentämällä D^e_{130} -arvoista regressiomallin tuottamat arvot kaavan 6 mukaisesti. Regressiomallin käyttö ei ollut välttämätöntä, sillä ero kaavalla 5 määritettyyn korjauksen tasoon oli pieni. Regressiomallin käyttö kuitenkin pienensi D^e_{130} -arvojen satunnaisvaihtelua. Korjauksen (kaava 6) vaikutus oli läpimitalla (D^e_{130}) 100 millimetriä $-0,78$ millimetriä ja läpimitalla 400 millimetriä $-2,45$ millimetriä.

$$D_{130} = D^e_{130} - \Delta D^{e-t}_{130} = D^e_{130} - (b_1^2 \times D^e_{130} + 2b_1b_2 \times D^e_{130} + b_2^2 + b_0) \quad (6)$$

, jossa:

D_{130} = läpimitta 130 etäisyydellä kaatoleikkauksesta, koetyvipölkkyjen tyvifunktiossa käytettävä arvo,

D^e_{130} = koetyvipölkkyjen 130 etäisyydeltä kaatoleikkauksesta mitattu läpimitta,

b_1, b_2 ja b_0 = mallin parametreja, joiden arvot ovat $b_1=0,0006$; $b_2=4,4981$ ja $b_0=-20$.

Mittausaineistojen perusteella koetyvipölkkyjen tyviosien läpimitan muutoksen metsästä tehtaalle (läpimittojen D^m_L ja D^t_L ero) havaittiin olevan erilaista eri mittauskohdissa L . Lähellä kaatosahausta (L on 10, 20 tai 50 cm) tyviosan läpimitan suhteellinen muutos oli suurempaa kuin ylempänä tyviosassa (L on 100 tai 130 cm). Siten tyviosien muoto tehtaalla mitattaessa ei täysin vastannut tilannetta metsässä. Hakkuukonemittauksen tyvifunktion taas on oleellisesti kuvattava tyviosan muotoa ja tilavuutta mittausajankohtana, siis metsässä.

Tyvifunktion korjaustarpeen määrittämisessä epätasainen kuluminen otettiin huomioon laskennallisesti seuraavalla tavalla:

Taulukko 2. Koetyvipölkkyjen läpimitan muutoksen metsästä tehtaalle (kaava 7) mallin parametrien c_1 , c_2 ja c_0 arvot mittauskohdissa L , kun L on 10, 20, 50, 100 tai 130 senttimetriä.

parametri	mittauskohta L , cm				
	10	20	50	100	130
c_1	1,60 E-05	8,41 E-06	1,69 E-06	8,10 E-07	1,00 E-06
c_2	-6,90 E-02	-4,97 E-02	-2,18 E-02	-1,50 E-02	-1,67 E-02
c_0	4,49	3,43	0,21	-0,35	-0,04

D^m_L ja D^t_L -läpimittojen erotukselle mittauskohdissa L (10, 20, 50, 100 ja 130 senttimetriä) laadittiin erilliset regressiomallit, joissa läpimitan absoluuttista muutosta kyseisessä mittauskohdassa selitettiin D^m_{130} -läpimitalla (kaava 7, taulukko 2).

$$\Delta D^{m-t}_L = c_1 \times D^m_{130}{}^2 + c_2 \times D^m_{130} + c_0 \quad (7)$$

, jossa:

ΔD^{m-t}_L = läpimitan muutos metsästä tehtaalle mittauskohdassa L ,

c_1 , c_2 ja c_0 ovat mallin parametreja, joiden arvot mittauskohdissa L ($L = 10, 20, 50, 100$ tai 130) on esitetty taulukossa 2.

Mittauskohdille L , kun L on 10, 20, 50, 100 tai 130 (kaava 1), muodostettiin laskennalliset tyviosan läpimittamatriisit seuraavasti:

- Läpimitat D^s_L laskettiin tyvifunktiolla (kaavat 1–4), kun läpimitalle D_{130} annettiin arvot 10–45 senttimetriä yhden senttimetrin luokissa ($D_L = D^s_L$).
- Läpimitat D^k_L , jotka määritettiin kaavalla 8. Kaavasta nähdään, että kohdassa L on 130 senttimetriä läpimittojen D^k_L ja D^s_L arvot ovat samat.

$$D^k_L = \frac{D^s_{130}}{D^s_{130} - \Delta D^{m-t}_{130}} \times D^s_L - \Delta D^{m-t}_{130} \quad (8)$$

Läpimittamatriisien D^s_L ja D^k_L perusteella laskettiin vastaavat tilavuusmatriisit V^s_L ja V^k_L 130 senttimetrin pituisille tyviosille, kun D_{130} saa arvot 10–45 senttimetriä yhden senttimetrin luokissa.

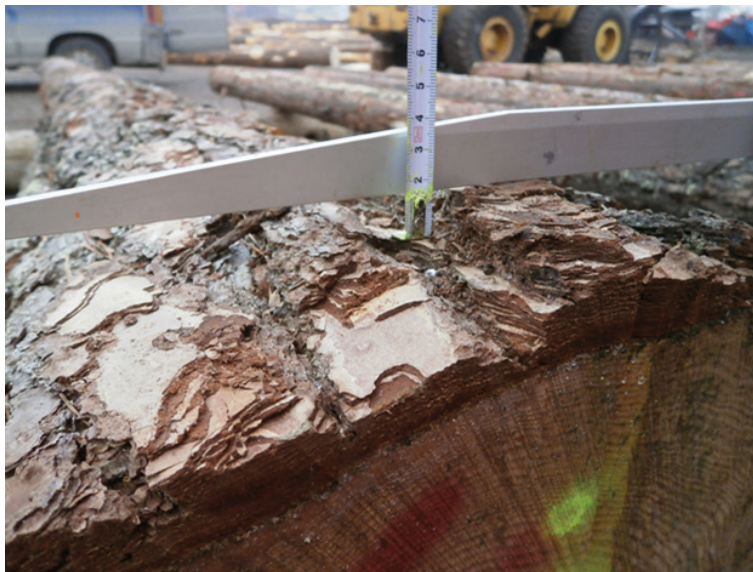
Tyvifunktion korjaustarvetta koskevat tulokset ovat esitetty suhteessa tyvifunktion määräämään tilavuuteen, jolloin tulokset näyttävät korjaustarpeen suunnan ja suuruuden. Korjaustarpeen laskentaperiaate on kaavojen 9 ja 10 mukainen.

$$\text{Korjaus} = \text{suureen todellinen arvo} - \text{suureen mitattu arvo} \quad (9)$$

$$\text{Korjaus} = \frac{\text{suureen todellinen arvo} - \text{suureen mitattu arvo}}{\text{suureen mitattu arvo}} \times 100\% \quad (10)$$

Laskettaessa koetyvipölkkykohtaista tyvifunktion korjaustarvetta otettiin huomioon laskennallisten tilavuuksien V^s_L ja V^k_L erotus (kaavat 11 ja 12). Tällä pyrittiin saamaan tyvifunktion korjaustarve vastaamaan tilannetta metsässä.

Saksimittauksella määrittetyssä läpimitassa kaarnankolot ja poikkileikkauksen konveksi muoto tulevat rajallisesti huomioon otetuiksi (kuva 6). Koetyvipölkkyjen kulumisesta aiheutuva läpimittojen muutosta ei kaarnaisuuden vuoksi voida pitää yhtenäisenä pölkkyjen vaipan kulumisena (kaava 7). Kaavoissa 11 ja 12 kulumisen vaikutuksen vaihteluväli määritettiin parametrin g



Kuva 6. Saksimitauksella määritetyssä läpimitassa kaarnankolat ja poikkileikkauksen konveksisuus eivät tule otetuksi huomioon.

arvoilla. Jos koetyvipölkkyjen kulumista ei oteta huomioon lainkaan, parametri g saa arvon 0. Jos kuluminen otetaan huomioon yhtenäisenä vaipan kulumisena, g saa arvon 1.

$$K^{tf} = V^u_{130} - V^{tf}_{130} + g(V^s_L - V^k_L) \quad (11)$$

$$K^{tf}_{\%} = \frac{V^u_{130} - V^{tf}_{130} + g(V^s_L - V^k_L)}{V^{tf}_{130}} \times 100\% \quad (12)$$

, joissa:

K^{tf} = tyvifunktion määräämän tilavuuden absoluuttinen korjaustarve,

$K^{tf}_{\%}$ = tyvifunktion määräämän tilavuuden suhteellinen korjaustarve [%],

V^{tf}_{130} = koetyvipölkyn tyvifunktion määräämä tilavuus 130 senttimetrin pituisella tyviosalla,

V^u_{130} = koetyvipölkyn upotustilavuus 130 senttimetrin pituisella tyviosalla,

V^s_L = tilavuusmatriisin arvo koetyvipölkyn D_{130} -läpimittaluokassa,

V^k_L = tilavuusmatriisin arvo koetyvipölkyn D_{130} -läpimittaluokassa,

g = parametri, jolla määritetään, kuinka suuri osuus koetyvipölkkyjen laskennallisesta kulumisesta otetaan huomioon.

3 Tulokset

3.1 Kannonkorkeus

Koepuiden kannonkorkeudet olivat tasoltaan normaaleja ja esimerkiksi tyveyksiä ei ollut ainaakaan merkittävässä määrin tehty. Koko koepuuaineistossa maastossa arvioitun (h_k^a) ja hakkuussa toteutuneen (h_k^f) kannonkorkeuden keskiarvot olivat 15,5 ja 15,6 senttimetriä. Vastaavat kannonkorkeuden keskihajonnat olivat 8,5 ja 6,6 senttimetriä. Koepuiden arvioitu ja toteutunut kannonkorkeus olivat siis keskimäärin lähes samat. Pienillä koepuilla kannonkorkeus arvioitiin maastossa (h_k^a) hieman lyhyemmäksi, ja vastaavasti suurilla hieman pidemmäksi kuin hakkuussa toteutunut kannonkorkeus (h_k^f) oli.

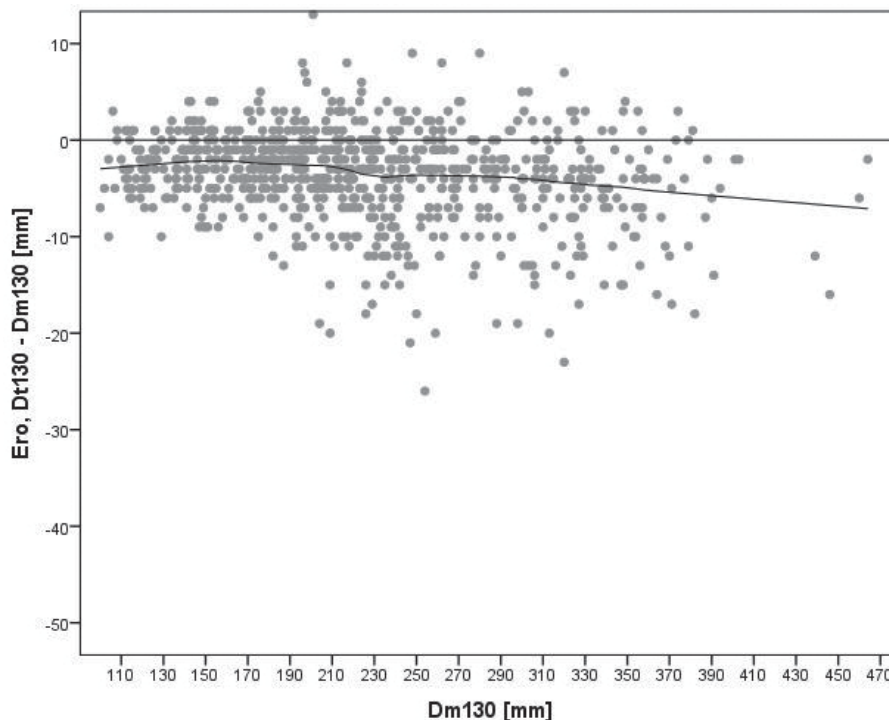
3.2 Koetyvipölkkyjen läpimitan muutos metsästä tehtaalle

Koepuiden tyviosan läpimitat pienentyivät metsästä tehtaalle kaikenkokoisilla koetyvipölkkyillä ja kaikissa mittauskohdissa. Läpimittojen D^m_{130} ja D^t_{130} ero oli kautta linjan pienempi, mutta samansuuntainen kuin läpimittojen D^m_{10} ja D^t_{10} ero (kuvat 7 ja 8). Merkille pantavaa oli, että läpimittojen D^m_{10} ja D^t_{10} ero suurentui nopeasti koetyvipölkkyjen järeyden (D^m_{130}) suhteen. Sen sijaan D^m_{130} ja D^t_{130} läpimittojen ero oli jokseenkin vakio koetyvipölkkyjen järeyden (D^m_{130}) suhteen.

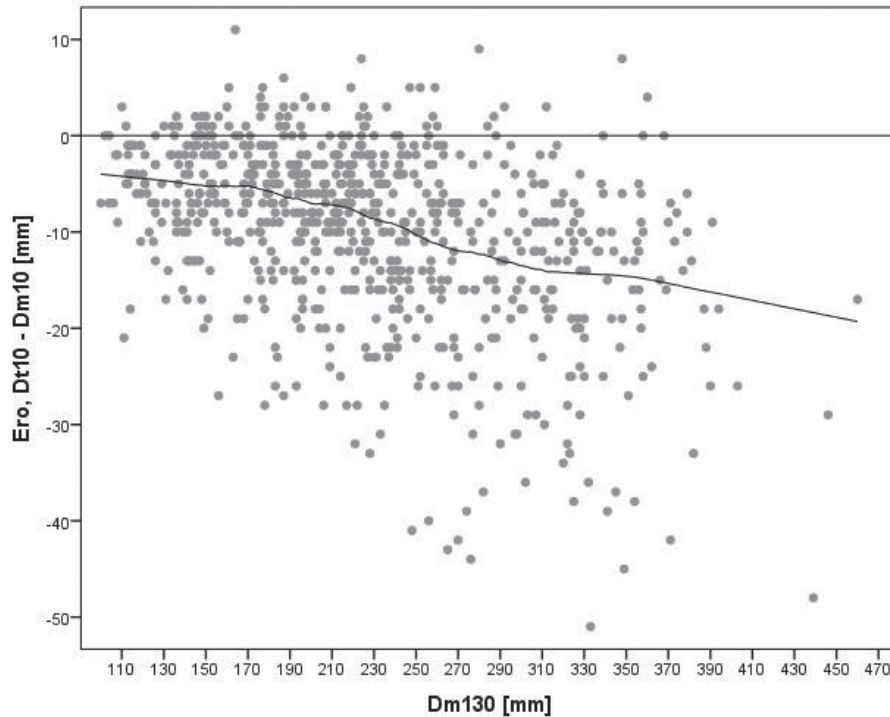
Läpimittojen D^m_L ja D^t_L eron keskiarvot koko mittausaineistossa olivat läpimitoilla D^m_{10} ja D^t_{10} $-10,0$ mm, läpimitoilla D^m_{20} ja D^t_{20} $-7,2$ mm, läpimitoilla D^m_{50} ja D^t_{50} $-4,6$ mm, läpimitoilla D^m_{100} ja D^t_{100} $-3,6$ mm ja läpimitoilla D^m_{130} ja D^t_{130} $-3,6$ mm. Vastaavat suhteelliset erot olivat $-3,4$, $-2,5$, $-1,8$, $-1,6$ ja $-1,6$ prosenttia. Läpimittojen suhteellinen muutos oli siis lähellä tyveä suurempi kuin ylemmissä mittauskohdissa.

3.3 Tyvifunktion korjaustarve

Tyvifunktion määräämän tilavuuden (V^f_{130}) korjaustarpeen ($K^f_{\%}$) keskiarvo koetyvipölkkyaineistossa oli $-5,7$ prosenttia ja keskihajonta $4,5$ prosenttiyksikköä (kaava 12, $g=0,5$). Koetyvipölkkyjen kuoren kulumisen ja sen huomioon ottaminen aiheutti epävarmuutta tyvifunktion korjaustarpeen todenmukaisen tason määrittämisessä. Jos kulumista ei oteta huomioon, saatiin tyvifunktion korjaustarpeen keskiarvoksi $-6,2$ prosenttia ja keskihajonnaksi $4,5$ prosenttiyksikköä (kaava 12, $g=0$). Jos kulumisesta aiheutuva läpimitan muutos otetaan huomioon kokonaisu-



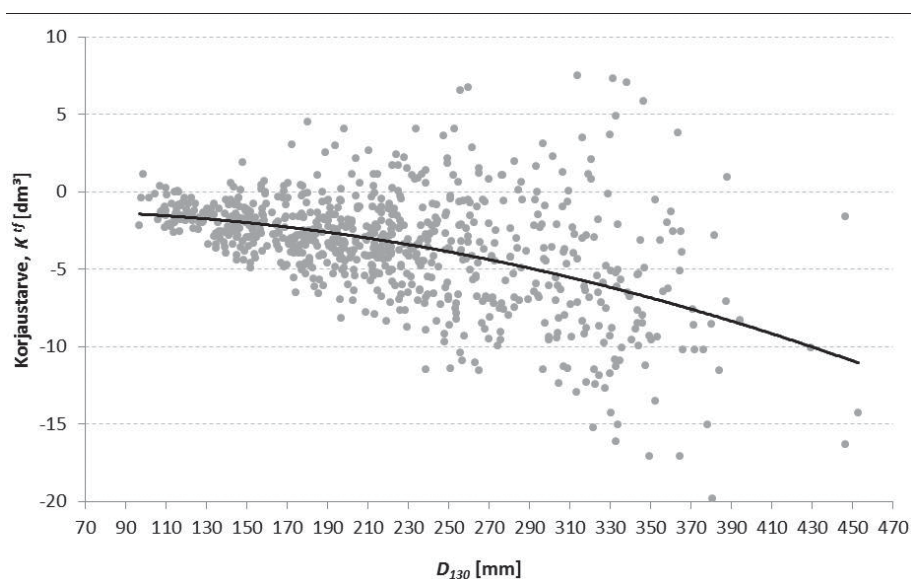
Kuva 7. Koepuista 130 senttimetrin etäisyydeltä arvioidusta kaatosahauksesta ($L = 130$) mitattujen läpimittojen (D^m_{130}) ja tehtaalla koetyvipölkkyistä samasta mittauskohdasta ja -suunnasta mitattujen läpimittojen (D^t_{130}) absoluuttiset erot koetyvipölkkyittäin D^m_{130} -läpimitan suhteen. Punainen käyrä on läpimittojen eron LOESS-tasointu.



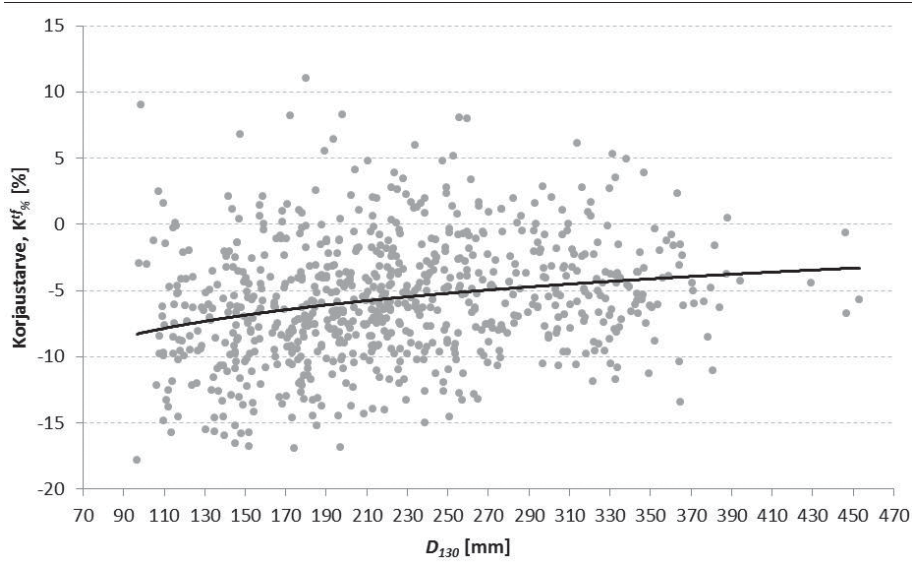
Kuva 8. Koepuista kymmenen senttimetrin etäisyydeltä arvioidusta kaatosahauksesta ($L = 10$) mitattujen läpimittojen (D^m_{10}) ja tehtaalla koetyvipölkkyistä samasta mittauskohdasta ja -suunnasta mitattujen läpimittojen (D^t_{10}) absoluuttiset erot koetyvipölkkyittäin D^m_{130} -läpimitan suhteen. Punainen käyrä on läpimittojen eron LOESS-tasoitus.

nessaan, olivat vastaavat arvot $-5,3$ ja $4,6$ (kaava 12, $g=1$). Edellinen tarkastelu muodostaa vaihteluvälin, jonka sisälle kuoren kulumisesta aiheutuva epävarmuus tyvifunktion korjaustarpeen määrittämisessä voi laskennallisin perustein asettaa.

Tyvifunktion määräämän tilavuuden korjaustarve muuttui selvästi koetyvipölkkyjen järeyden (D_{130}) suhteen (kuvat 9 ja 10). Absoluuttinen tilavuuden korjaustarve (K^t) oli D_{130} -läpimitaltaan



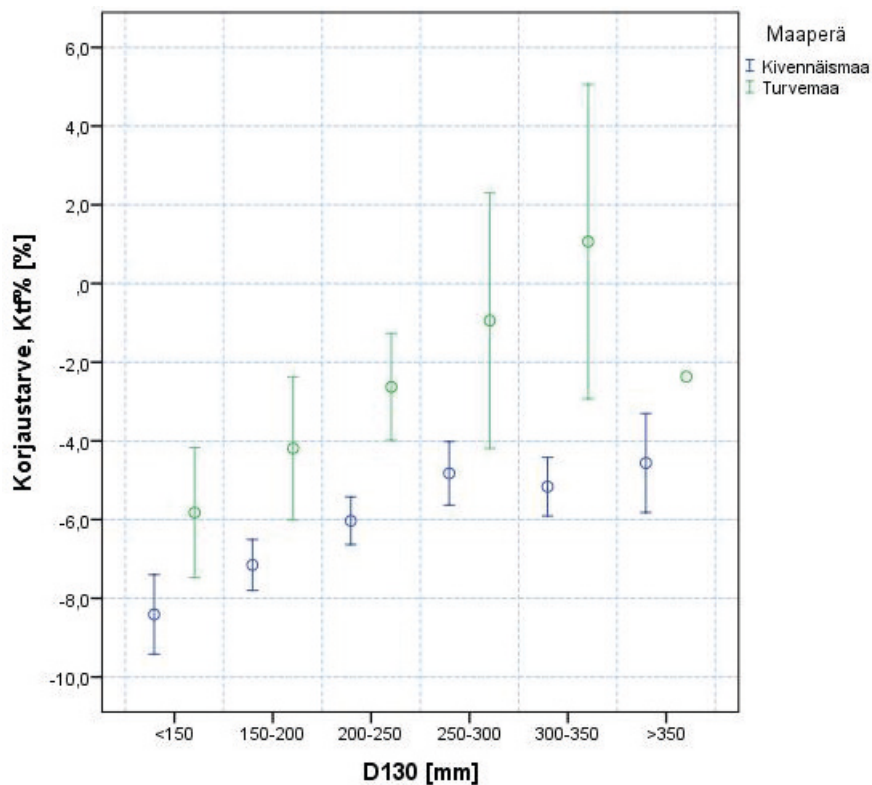
Kuva 9. Tyvifunktion määräämän tilavuuden (V^t_{130}) absoluuttinen korjaustarve (K^t) koetyvipölkkyaineistossa järeyden (D_{130}) suhteen.



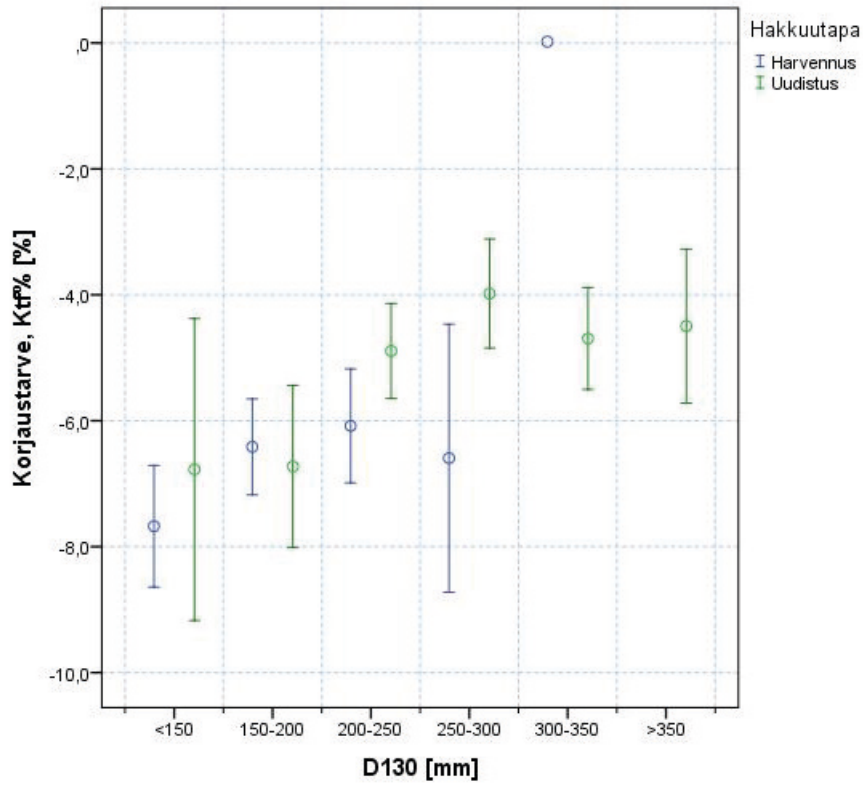
Kuva 10. Tyvifunktion määräämän tilavuuden (V_{130}^{tf}) suhteellinen korjaustarve ($K_{\%}^{tf}$) koetyvipölkkyaineistossa järeyden (D_{130}) suhteen.

100 millimetrin tyviosalla noin $-1,2$ kuutiodesimetriä ja 400 millimetrin tyviosalla noin $-8,4$ kuutiodesimetriä. Vastaavat suhteelliset tilavuuden korjaustarpeet ($K_{\%}^{tf}$) olivat noin $-8,4$ ja $-4,2$ prosenttia, eli suhteellinen korjaustarve oli selvästi suurempi pienillä puilla.

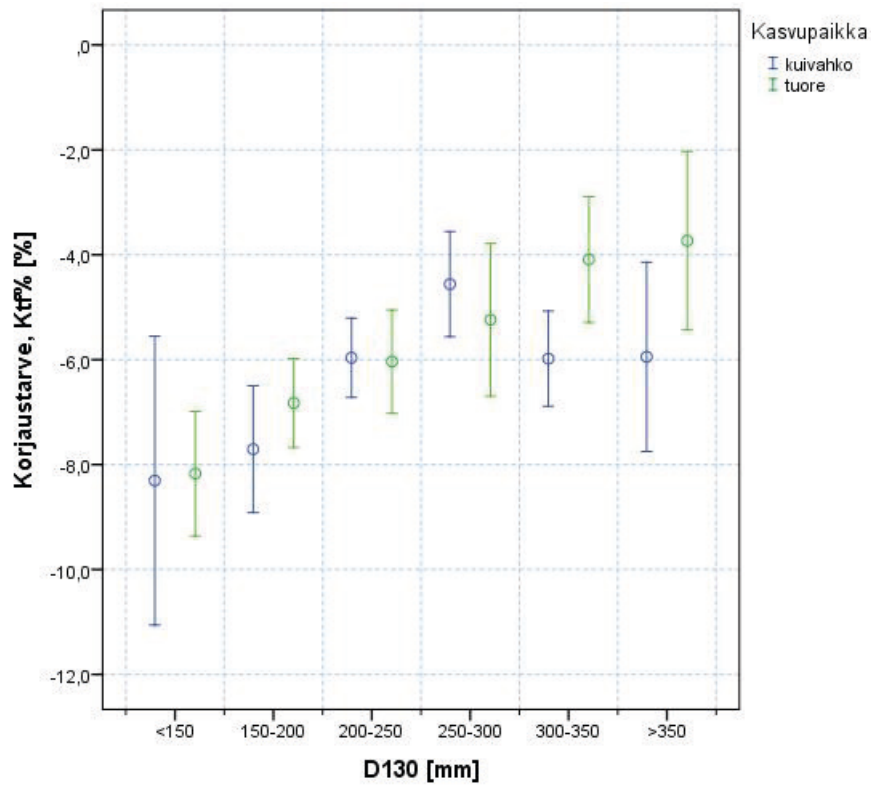
Tarkasteltaessa tyvifunktion korjaustarvetta maantieteellisen alueen, maaperän, kasvupaikan tai hakkuutavan mukaan, on koepuiden järeyttä otettava huomioon. Kuvissa 11–14 on tarkastelu



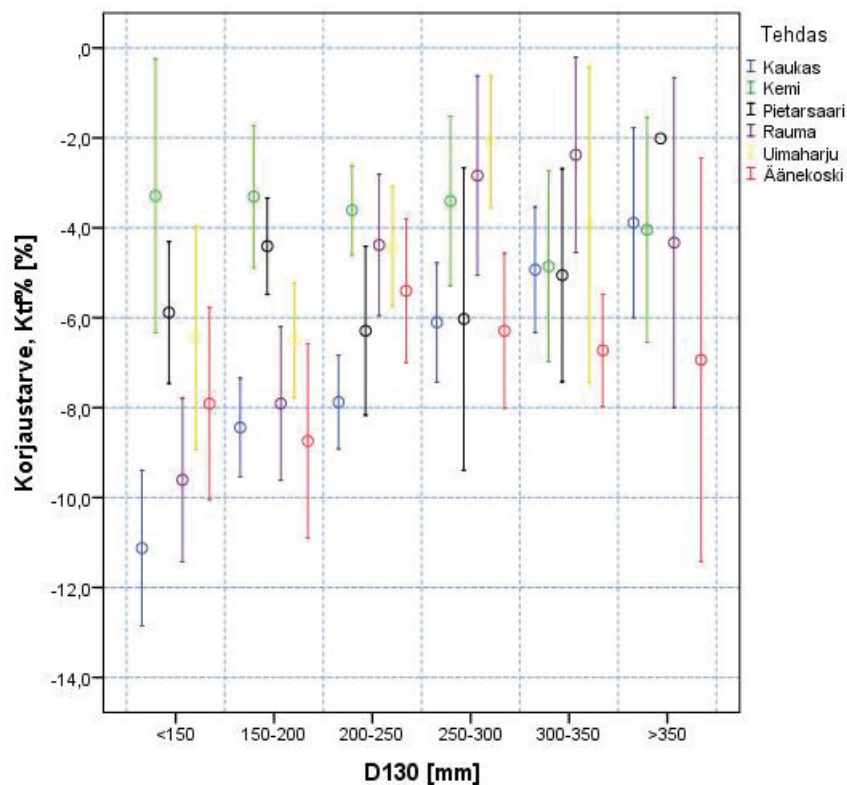
Kuva 11. Tyvifunktion määräämän tilavuuden (V_{130}^{tf}) suhteellinen korjaustarve ($K_{\%}^{tf}$) (keskiarvo ja 95 %:n luottamusväli) koetyvipölkkyjen järeyssluokittain (D_{130}) maaperän mukaan.



Kuva 12. Tyvifunktion määrämän tilavuuden (V_{130}^t) suhteellinen korjaustarve (K_f^t) (keskiarvo ja 95 %:n luottamusväli) koetyvipölkkyjen järeysluokittain (D_{130}) hakkuutavan mukaan.



Kuva 13. Tyvifunktion määrämän tilavuuden (V_{130}^t) suhteellinen korjaustarve (K_f^t) (keskiarvo ja 95 %:n luottamusväli) koetyvipölkkyjen järeysluokittain (D_{130}) kasvupaikan mukaan.



Kuva 14. Tyvifunktion määräämän tilavuuden (V_{130}^f) suhteellinen korjaustarve (K_{fP}^f) (keskiarvo ja 95 %:n luottamusväli) koetyvipölkkyjen järeysluokittain (D_{130}) tehtaan mukaan.

tyvifunktion korjaustarvetta ositteittain eri läpimittaluokissa ja taulukoissa 3–7 ositteiden tilastollista merkittävyyttä läpimitan suhteen lineaarisen korjaustarpeen mallin lisäselittäjinä. Metsiköiden sisäisen korrelaation vaikutus merkittävyyteen otettiin huomioon käyttämällä sekamallia, joka sisälsi metsikkökohtaiset satunnaiskomponentit. Tyvifunktion korjaustarve oli turvemaiden pienempi kuin kivennäismailla jokseenkin kaikissa läpimittaluokissa (kuva 11). Toisin sanoen tyvifunktio vastasi paremmin turvemaiden kuin kivennäismaiden puustoa. Taulukon 3 perusteella turvemaiden

Taulukko 3. Tyvifunktion tilavuuden (V_{130}^f) suhteellisen korjaustarpeen (K_{fP}^f) lineaarinen sekamalli, jossa kiinteinä selittävinä muuttujina ovat koetyvipölkyn D_{130} -läpimitta (mm) ja maaperä (kivennäismaa/turvetta) ja satunnaistekijänä metsikkö. Kivennäismaiden mallissa korjaustarpeen odotusarvo on $a_0 + b_0 \times D_{130}$ ja turvemaiden mallissa $a_0 + a_1 + (b_0 + b_1) \times D_{130}$. p-arvo mittaa tilastollista merkittävyyttä parametrien poikkeamalle 0:sta.

parametri	estimaatti	keskivirhe	p-arvo
a_0	-9,7592	0,8821	<0,0001
b_0	0,0157	0,0028	<0,0001
a_1	-0,4872	1,6476	0,7699
b_1	0,0184	0,0074	0,0128

Taulukko 4. Tyvifunktion tilavuuden (V_{130}^f) suhteellisen korjaustarpeen ($K_{\%}^f$) lineaarinen sekamalli, jossa kiinteinä selittävinä muuttujina ovat koetyvipölkyn D_{130} -läpimitta (mm) ja hakkuutapa (harvennus/uudistus) ja satunnaistekijänä metsikkö. Harvennushakkuiden mallissa korjaustarpeen odotusarvo on $a_0 + b_0 \times D_{130}$ ja uudistushakkuiden mallissa $a_0 + a_1 + (b_0 + b_1) \times D_{130}$.

parametri	estimaatti	keskivirhe	p-arvo
a_0	-10,1500	1,1481	<0,0001
b_0	0,0206	0,0049	<0,0001
a_1	1,1282	1,4709	0,4503
b_1	-0,0053	0,0059	0,3761

Taulukko 5. Tyvifunktion tilavuuden (V_{130}^f) suhteellisen korjaustarpeen ($K_{\%}^f$) lineaarinen sekamalli, jossa kiinteinä selittävinä muuttujina ovat koetyvipölkyn D_{130} -läpimitta (mm) ja kasvupaikkatyyppi (tuore kangas / kuivahko kangas) ja satunnaistekijänä metsikkö. Tuoreiden kankaiden mallissa korjaustarpeen odotusarvo on $a_0 + b_0 \times D_{130}$ ja kuivahkojen kankaiden mallissa $a_0 + a_1 + (b_0 + b_1) \times D_{130}$.

parametri	estimaatti	keskivirhe	p-arvo
a_0	-9,1332	1,2186	<0,0001
b_0	0,0121	0,0041	0,0030
a_1	-0,5758	1,5843	0,7197
b_1	0,0040	0,0057	0,4782

Taulukko 6. Tyvifunktion tilavuuden (V_{130}^f) suhteellisen korjaustarpeen ($K_{\%}^f$) lineaarinen sekamalli, jossa kiinteinä selittävinä muuttujina ovat koetyvipölkyn D_{130} -läpimitta (mm) ja hankinta-alue (tehdas) ja satunnaistekijänä metsikkö. Vertailutasona mallissa oli Kaukaan tehtaan hankinta-alue, jolle korjaustarpeen odotusarvo on $a_0 + b_0 \times D_{130}$; muiden alueiden malleissa odotusarvo on $a_0 + a_i + (b_0 + b_i) \times D_{130}$, missä i :n arvo 1 viittaa Kemiin, 2 Pietarsaareen, 3 Raumaan, 4 Uimaharjuun ja 5 Äänekoskeen.

parametri	estimaatti	keskivirhe	p-arvo
a_0	-14,6584	1,5843	<0,0001
b_0	0,0303	0,0058	<0,0001
a_1	10,234	2,2314	0,0001
b_1	-0,0269	0,0081	0,0009
a_2	7,2865	2,4642	0,0065
b_2	-0,0205	0,0101	0,0437
a_3	4,3224	2,3025	0,0717
b_3	-0,0083	0,0086	0,3331
a_4	4,8686	2,4514	0,0577
b_4	-0,0077	0,0099	0,4339
a_5	4,0544	2,2409	0,0820
b_5	-0,0148	0,0081	0,0698

Taulukko 7. Jäännösvaihtelun (varianssin) jakautuminen hankinta-alueiden väliseen, alueen eri metsiköiden väliseen ja metsiköiden sisäiseen taulukon 5 mukaisessa mallissa.

vaihtelun lähde	varianssi	osuus, %
alue	1,6	8,5
metsikkö	2,1	11,6
jäännös	14,7	79,9

ja kivennäismaiden ero suureni merkitsevästi läpimitan kasvaessa (parametrin b_1 p-arvo = 0,0128). Etenkin läpimittaluokissa, 150–200 ja 200–250 mm, joissa koepuiden määrä oli molemmilla hakkuutavoilla suurin, hakkuutavalla – siis käytännössä metsikön kehitysluokalla – ei ollut vaikutusta tyvifunktion korjaustarpeen suuruuteen (parametrin b_1 p-arvo > 0,05) (kuva 12, taulukko 4). Kasvupaikalla, silloin kun tarkasteltavina olivat ainoastaan kivennäismaiden tuoreet ja kuivahkot kankaat, ei myöskään ollut vaikutusta korjaustarpeeseen (parametrin b_1 p-arvo > 0,05) (kuva 13, taulukko 5). Maantieteellisen alueen mukaan (tehtaat) tehdyssä tarkastelussa pienillä puilla erottui Kemin ja jossakin määrin myös Pietarsaaren hankinta-alueiden pienempi korjaustarpeen keskiarvo (kuva 14). Taulukon 6 perusteella korjaustarpeen muutos järeyden kasvaessa oli Kemin ja Pietarsaaren alueilla merkitsevästi pienempi kuin taulukon mallin vertailutasen määrittäneellä Kaukaan alueella (parametrien b_1 ja b_2 p-arvot < 0,05). Mallissa, johon otettiin mukaan merkitseväksi osoittautuneet selittäjät läpimitta ja alue, suurin osa jäännösvaihtelusta oli metsiköiden sisäistä (taulukko 7).

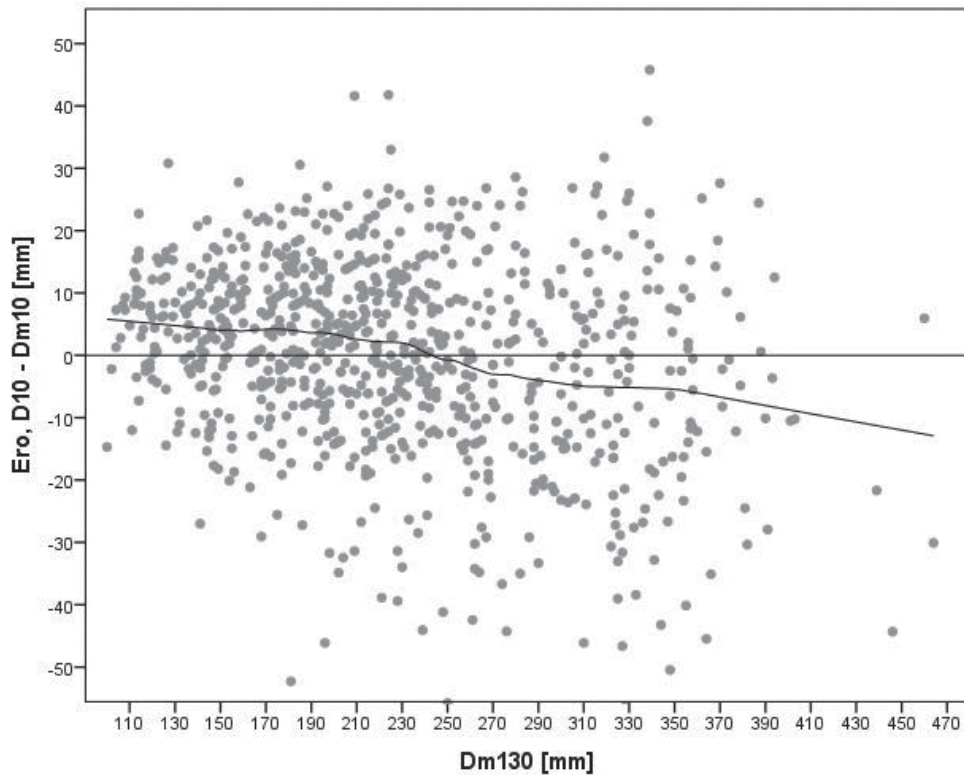
3.4 Tyvifunktiolla määritettyjen ja metsässä mitattujen läpimittojen vertailu

Pienillä puilla tyvifunktio tuotti suurempia, ja suurilla puilla pienempiä läpimittoja koepuiden saksimittaukseen verrattuna (kaavat 1–4, kuvat 15 ja 16). Läpimittojen D_{50}^m ja tyvifunktiolla määritetyn D_{50} arvojen erot olivat samansuuntaisia kuin läpimitoilla D_{10}^m ja D_{10} , mutta pienempiä. Samoin erojen hajonta ja vaihteluväli olivat 50 senttimetrin mittauskohdassa ($L=50$) huomattavasti pienempiä kuin kymmenen senttimetrin mittauskohdassa ($L=10$). Sadan senttimetrin mittauskohdassa ($L=100$) läpimittojen erot olivat varsin pieniä. On johdonmukaista, että erot pienentyvät, mitä lähempänä tarkasteltava mittauskohta L on 130 senttimetrin mittauskohtaa ($D_{130} = D_{130}^m$). Tuloksen perusteella tyvifunktiossa oli saksimittauksiin verrattuna kaikissa mittauskohdissa poikkeama, joka oli eritasoinen ja erisuuntainen D_{130} -läpimitan suhteen.

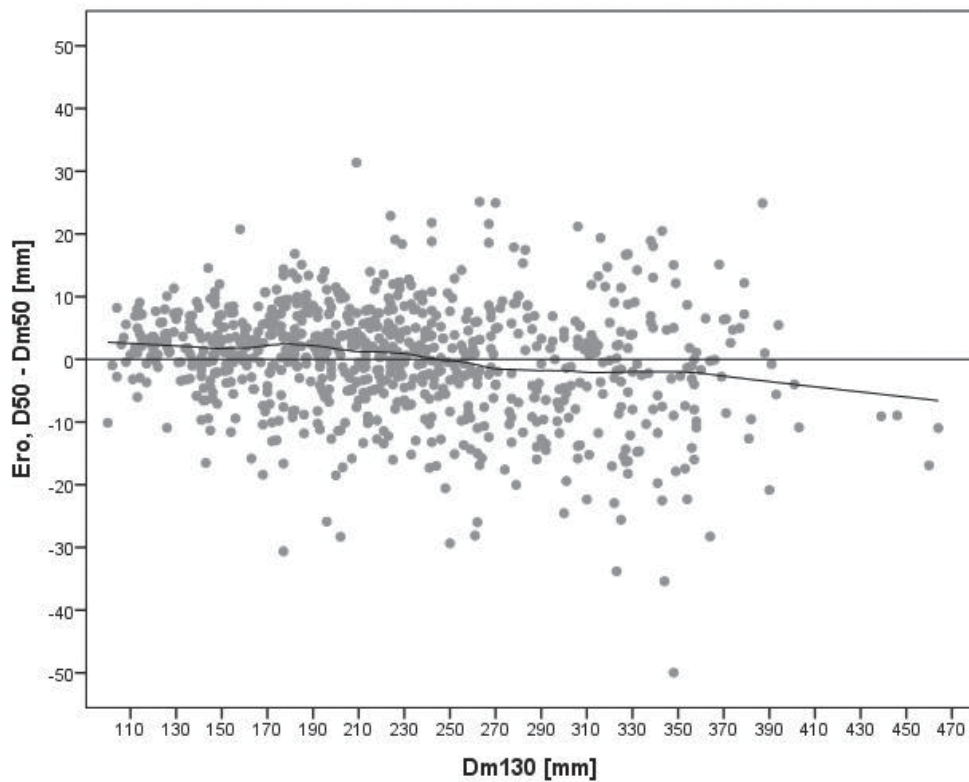
3.5 Tyvifunktion korjaus ja parametrien arvojen määrittäminen

Tyvifunktioissa tyviosan suhteelliset läpimitat ja muoto muuttuvat tyven järeyden (D_{130}) suhteen. Tämä johtuu mallien rakenteesta, jossa varsinaisen tyvifunktion parametreja (ns. muotoparametrit) määritetään puulajikohtaisilla malleilla, joissa selittäjänä on läpimitta 130 senttimetrin etäisyydellä kaotosahauksesta (D_{130}) (kaavat 1–4). Tästä seuraa, että tässä tarkasteltavassa tyvifunktiossa suhde D_L/D_{130} missä tahansa läpimitan mittauskohdassa L muuttuu järeyden suhteen.

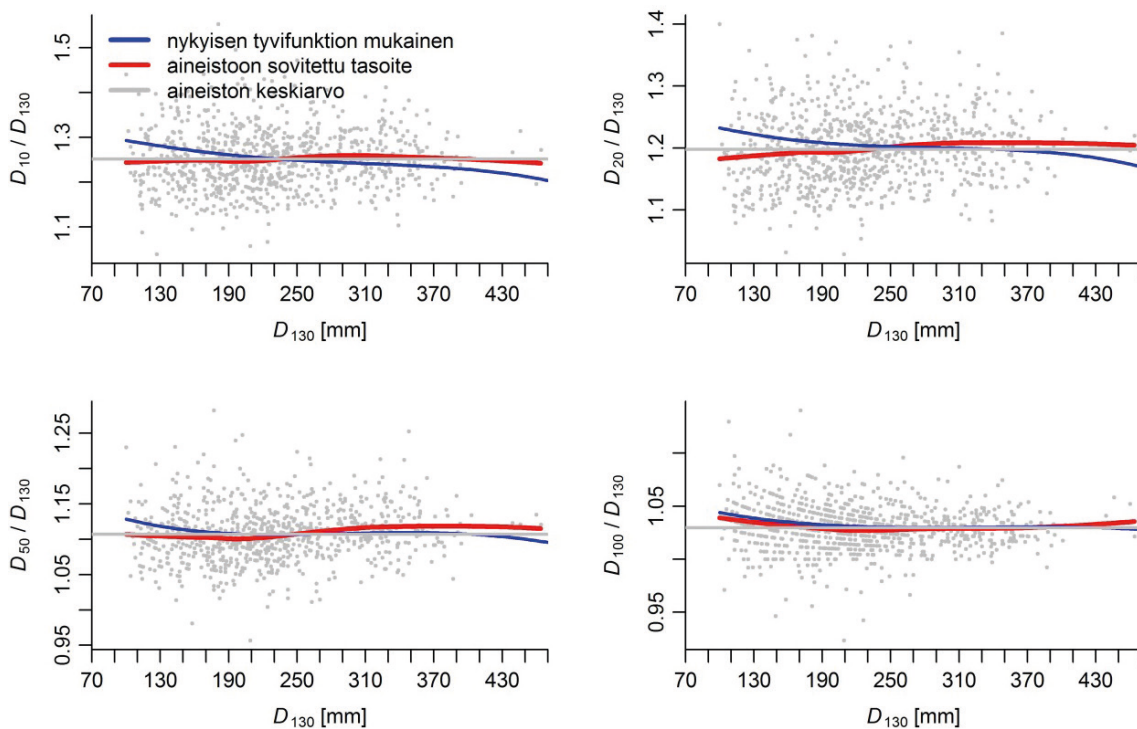
Tämän tutkimuksen koepuista metsässä mitatussa läpimitta-aineistossa (D_{10}^m , D_{20}^m , D_{50}^m ja D_{100}^m) tyven suhteellinen läpimitta ei merkittävästi muuttunut tyvipölkyn järeyden (D_{130}^m) suhteen, vaan on likimäärin vakio (kuva 17). Tyvifunktion kannalta tämä tarkoitti sitä, että muotoparametrien arvoja ei ollut tarpeellista mallintaa, vaan ne voitiin korvata vakioarvoilla. Tämän



Kuva 15. Koepuille kymmenen senttimetrin etäisyydelle arvioidusta kaatosahauksesta ($L=10$) tyvifunktiolla määritettyjen (D_{10}) ja metsässä mitattujen (D^m_{10}) läpimittojen absoluuttiset erot koepölkkyittäin D^m_{130} -läpimitan suhteen. Punainen käyrä on läpimittojen eron LOESS-tasointus.



Kuva 16. Koepuille 50 senttimetrin etäisyydelle arvioidusta kaatosahauksesta ($L=50$) tyvifunktiolla määritettyjen (D_{50}) ja metsässä mitattujen (D^m_{50}) läpimittojen absoluuttiset erot koepölkkyittäin D^m_{130} -läpimitan suhteen. Punainen käyrä on läpimittojen eron LOESS-tasointus.



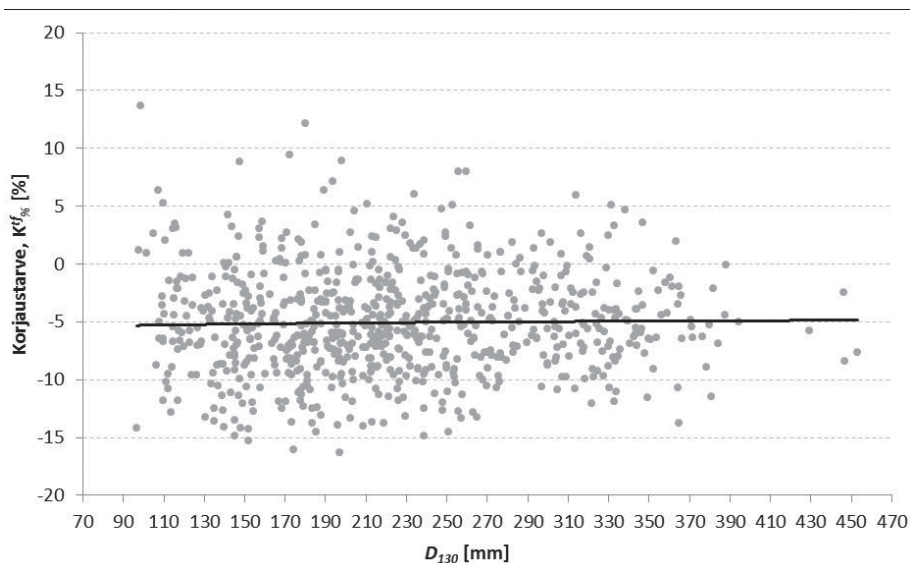
Kuva 17. Eri mittauskohtien ($L = 10, 20, 50$ ja 100) läpimittojen suhde mittauskohdan $L=130$ läpimittaan järeyden (D_{130}) suhteen. Sininen viiva kuvaa nykyisen tyvifunktion suhteellisia läpimittoja (D_L / D_{130}), punainen viiva oikaistu- ja tasokorjatun tyvifunktion suhteellisia läpimittoja (D_L / D_{130}) ja harmaa viiva tutkimusaineiston suhteellisia läpimittoja ($D^m_{10}; D^m_{20}; D^m_{50}; D^m_{100} / D^m_{130}$).

havainnon perusteella sovitettiin läpimitan eri mittauskohdille ($D^m_{10}, D^m_{20}, D^m_{50}$ ja D^m_{100}) mitattuihin läpimittoihin tyvifunktion mukainen epälineaarinen malli, jonka parametrit estimoitiin järeydestä riippumattomina vakioina.

Lähtökohtaisesti tavallinen pienimmän jäännöseliösumman menetelmä (NLS) ei johda tehokkaimpiin mahdollisiin estimaattoreihin, koska mallin jäännösten (mallin ja havainnon ero) vaihtelu on suurempaa alemmaa mitatuissa läpimitoissa ja suuremmilla järeyksillä ja saman metsikön ja koealan puiden jäännökset ovat korreloituneita. Siksi NLS-menetelmän lisäksi otettiin tarkasteluun kaksi painotettua pienimmän neliösumman estimaattoria WLS1 (kullekin korkeudelle erikseen arvioitu jäännösvarianssi, jonka käänteisluku estimointipainona) ja WLS2 (painot $w = w_1 w_2$, missä w_1 = WLS1:n mukainen paino ja w_2 kääntäen verrannollinen järeyteen) sekä jäännösten korrelaattorakenteen huomioon ottavat sekamallit NLME 1/2 (metsikkö-, koeala- ja puutason satunnaiskomponenteilla, puun sisäisellä AR-autokorrelaatiolla mittauskorkeuden suhteen ja WLS1/2:n mukaisilla painoilla).

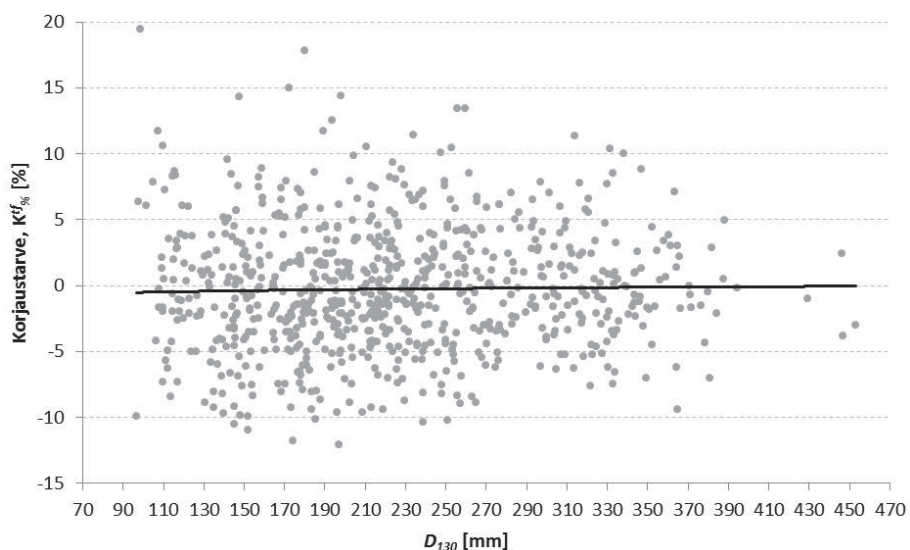
Vakioparametrinen tyvifunktio sopi mittausaineistoon selvästi nykyistä tyvifunktiota paremmin riippumatta siitä, miten parametrien arvot estimoitiin. Koska erot vakioparametrisilla malleilla ennustettujen tilavuuksien välillä olivat minimaalisia (alle 2 %), valittiin käytettäväksi yksinkertaisin NLS-malli. Oikaistulle tyvifunktiolle (kaava 1, NLS-malli) määritetyt parametrien a_0, a_1 ja a_2 arvot olivat 9,50 (keskivirhe 0,59), 7,00 (k.v. 0,67) ja 3,60 (k.v. 0,29).

Koetyvipölkkyjen tyviosien upotustilavuuden ja läpimittojen suhteen oikaistun, vakioparametrin tyvifunktion suhteellinen ero on samaa suuruusluokkaa kaikilla järeyksillä, siis upotustilavuus oli noin viisi prosenttia pienempi kuin oikaistun tyvifunktion määräämä tilavuus (kuva 18,



Kuva 18. Oikaisukorjatun tyvifunktion määräämän tilavuuden (V_{130}^f) suhteellinen korjaustarve ($K_f\%$) koetyvipölkkyaineistossa järeyden (D_{130}) suhteen. Musta viiva on korjaustarpeen lineaarinen tasoitus.

virt. kuva 10). Järeystä riippumaton suhteellinen tasokorjaus tehtiin muuttamalla oikaistun tyvifunktion parametrin a_0 arvoa. Parametrin a_0 arvojen muuttaminen vaikuttaa tyvifunktion tuottamiin läpimitoihin lineaarisesti. Voidaan ajatella, että parametrin a_0 arvon pienennys leikkaa tyvifunktiosta tasaisesti tyveä kohti paksunevan kaistaleen. Parametrin a_0 arvoksi saatiin 5,50. Parametrin muutoksella upotustilavuuden ja tyvifunktion määräämän tilavuuden systemaattinen ero saatiin korjatuksi lähelle nollassa (kuva 19).



Kuva 19. Oikaisu- ja tasokorjatun tyvifunktion määräämän tilavuuden (V_{130}^f) suhteellinen korjaustarve ($K_f\%$) koetyvipölkkyaineistossa järeyden (D_{130}) suhteen. Musta viiva on korjaustarpeen lineaarinen tasoitus.

4 Tulosten tarkastelu

Tämän tutkimuksen keskeisenä tavoitteena oli tarkastaa, määrittää korjaustarve ja tarvittaessa määrittää korjaus hakkuukonemittauksessa käytettävälle männyn tyvifunktiolle. Tutkimuksessa kerättiin verraten laaja koearineisto, joka koostui kaikkiaan 33 koemetsiköstä ja näiden 825 mitattua koepuusta. Koepuiden valinta pyrittiin vakioimaan otantamenetelmällä, joka on toistettavissa, mutta joka jätti tutkimuksen tarkoituksenmukaisen toteuttamisen kannalta riittävän harkinnanvaran ja reunaehdot koepuiden valinnalle. Koepuiden valinnassa käytetyn linjakoealoilta tehdyn relaskooppiotannan heikkoutena voidaan pitää sitä, että koemetsiköiden reunoilla olevilla puilla oli pienempi todennäköisyys tulla valituiksi otokseen.

Tehtaiden mittauspaikeille toimitettiin 793 koetyvipölkkyä, joka on 32 vähemmän, kuin koepuiden määrä. Koepuiden hakkuu, lähikuljetus ja kaukokuljetus tehtiin koemetsiköiden normaalin korjuun ja kuljetusten yhteydessä. Erehdyksen vuoksi yhden koemetsikön koetyvipölkkyt (25 kappaletta) kuljetettiin tehtaan tuotantoon toimittamatta niitä ensin puukentälle mitattaviksi. Tämän lisäksi muissa koemetsiköissä yhteensä seitsemän koetyvipölkkyä oli todennäköisesti lähtänyt kaukokuljetuksen yhteydessä sekoittunut muuhun puutavarasumaan.

Tutkimuksen tavoitteen kannalta oli keskeistä seurata kannonkorkeutta koehakkuissa. Koepuiden kannonkorkeuden tuli vastata mahdollisimman hyvin normaalia puunkorjuuta. Koska rungon kapeneminen muuttuu nopeasti puun tyvellä, johtavat tavallista pidemmät kannot liian pieniin tyviosan tilavuuksiin, tilavuuden vertailuarvoihin ja edelleen virhepäätelmiin tyvifunktion korjaustarpeen suuruudesta. Luonnollisesti tilanne on vastaava, mutta suunnaltaan päinvastainen tilanteessa, jossa kannot ovat tavallista lyhyempiä. Metsässä koepuista arvioidun kannonkorkeuden (h_k^a) ja hakkuussa toteutuneen kannonkorkeuden (h_k^t) keskiarvot olivat lähes samat (15,5 ja 15,6 senttimetriä), mikä tukee sitä käsitystä, että koepuiden kannonkorkeudet eivät tasoltaan poikenneet normaalista. Koko aineistossa oli ainoastaan yksi selvästi poikkeavan pitkä kanto. Koepuiden hakkuussa työohjeita oli siis noudatettu erittäin hyvin.

Tyvifunktion määräämän tilavuuden (V_{130}^{tf}) suhteellinen korjaustarve ($K_{\%}^{tf}$) määritettiin upotustilavuuden tilavuuden (V_{130}^u) ja tyvifunktion määräämän tilavuuden erotuksen suhteena tyvifunktion määräämän tilavuuteen. Oikeantasaisen korjaustarpeen määrittämisen kannalta oli oleellista, että tyvifunktion määräämä tilavuus määritettiin tarkoituksenmukaisella tavalla. Erityisen tärkeää oli kiinnittää huomiota tyvifunktion syöttöarvona käytettävän D_{130} -läpimitan määrittämiseen. Lisäksi oli otettava huomioon koepölkkyjen käsittelyistä aiheutuva kuluminen.

Koetyvipölkkyistä mitattiin läpimitat 130 senttimetrin etäisyydeltä kaatosahauksesta (D_{130}^e) ja oletetusta kannonkorkeudesta (D_{130}^t) (vrt. kohdat 2.6 ja 2.7). D_{130}^e -läpimittojen arvot olivat hieman suurempia kuin D_{130}^t -läpimittojen arvot. Koko aineistossa läpimittojen absoluuttisen eron keskiarvo oli 1,9 millimetriä ja suhteellisen eron keskiarvo 0,9 prosenttia. Eron voidaan arvioida johtuvan lähes kokonaisuudessaan niistä määritelmällisistä läpimitoista, joiden arvoja mittauksissa tavoiteltiin. Sinänsä D_{130}^e -läpimita on mittaushavaintojen määrän vuoksi luotettavampi ja ottaa huomioon myös pölkyn epäpyöreyyden. Sen sijaan D_{130}^t -läpimitan validius on parempi kyseessä olevassa tarkoituksessa.

Koejärjestelyssä mittauksia tehtiin metsässä, mutta myös tehtaiden puukentillä, jolloin koetyvipölkkyjen kuori oli joutunut rasitukselle hakkuun, lähikuljetuksen ja kaukokuljetuksen aikana. Mittausten perusteella oli havaittavissa läpimitan pienentyminen metsästä tehtaalle. Läpimittaerojen suuri hajonta ja varsinkin muutamat suurehkot positiiviset arvot kertoivat haasteesta uusissa mittaus täsmälleen samanlaisena. Suuren havaintomäärän avulla kuitenkin saatiin hyvä käsitys ilmiöstä.

Tyvifunktion korjaustarpeen määrittämisen kannalta oleellinen havainto oli se, että kulumisesta aiheutuva läpimittojen suhteellinen muutos oli samalla tasolla mittauskohdissa 50, 100 ja 130

etäisyydellä kaatosahauksesta, mutta suurempi lähellä kaatosahausta ($L = 10$ tai 20). Jos läpimitan suhteellinen muutos olisi samalla tasolla tyviosan kaikissa mittauskohdissa, toisin sanoen kuluminen tyviosalla olisi tasaista, olisi kuluminen periaatteessa voitu jättää huomiotta tyvifunktion korjaustarpeen määrittämisessä; tällöin tyvifunktion syöttöarvon (D_{130}) mittauskohdan ($L = 130$) kuluminen sinällään korjaisi tilavuuden mittaustuloksen todenmukaiselle tasolle. Koska kuluminen oli kuitenkin suurempaa lähellä tyveä, tämä täytyi ottaa laskennallisesti huomioon tyvifunktion korjaustarvetta pienentävänä tekijänä. Laskenta-aineiston perusteella pystyttiin määrittämään ainoastaan vaihteluväli sille tilavuuden muutokselle, jonka kuluminen aiheutti koepölkkyjen tyviosan tilavuuksissa. Käytännöllisistä syistä päädyttiin harkinnanvaraiseen ratkaisuun siten, että tyvifunktion korjaustarpeen määrittämisessä otettiin huomioon tilavuuden muutoksena puolet tästä vaihteluvälistä.

Koetyvipölkkyjen tyviosan vertailutilavuuden määrittämisestä upotusmittauksella (vertailumenetelmä) ja tähän liittyvää mittausepävarmuutta on verraten perusteellisesti arvioitu tämän tutkimuksen esitutkimuksessa (Lindblad ym. 2013). Menetelmästä käytetään myös nimitystä hydrostaattinen mittaus (Kärkkäinen 1984). Keskeiset epävarmuuslähteet ovat punnitus sekä ilmassa että upotettuna, ja upotussyvyyden määrittäminen. Lisäksi hydrostaattisen mittauksen tarkkuuteen vaikuttaa veden lämpötila, jonka merkitys on kuitenkin niin vähäinen, että se voidaan tässä jättää huomioimatta (Lindblad ym. 2013). Esitutkimuksessa määritetty vaakojen askelarvosta aiheutuva suhteellisen mittausepävarmuuden vaihteluväli $0,07$ – $0,9$ prosenttia tyviosan tilavuuden määrittämisessä vastanee hyvin tämän tutkimuksen tilannetta.

Upotusmittauksen merkittävin mittausepävarmuustekijä on todennäköisesti upotussyvyys, jossa yhdistyvät upotusmerkinnän sijainnista ja upotuksesta aiheutuvat epävarmuudet. Esitutkimuksessa upotussyvyyden laajennetuksi epävarmuudeksi oli arvioitu $1,1$ senttimetriä, joka on todennäköisesti liian pieni arvo. Jos epävarmuudeksi arvioidaan kaksi senttimetriä, on upotussyvyyden suhteellinen epävarmuus 130 senttimetrin tyviosien tilavuuden (V_{130}^m) mittauksessa $1,5$ prosenttia.

Yhdistämällä vaakojen askelarvoista ja upotussyvyydestä aiheutuvat mittausepävarmuudet, saadaan tyviosan (0 – 130 senttimetriä) upotusmittauksen laajennetuksi kokonaisepävarmuudeksi erikokoisilla pölkyillä $1,5$ – $1,8$ prosenttia. On huomattava, että tässä on kysymyksessä arvio nimenomaan tilastollisesta mittausepävarmuudesta, siis satunnaisista virhelähteistä. Ei kuitenkaan ole syytä olettaa, että punnitukseen tai upotussyvyyden määrittämiseen sisältyisi merkittävä systemaattista virhettä.

Tyvifunktion korjauksessa lähtökohtana oli, että tyvifunktion tulisi tuottaa sellaisia läpimittoja, että tilavuuden määrittämisessä päästään todenmukaiseen tilavuuteen. Toisaalta lähtökohtana oli tyvifunktion matemaattisen esittämistavan säilyttäminen, mikä oli käytännölliset näkökohdat huomioon ottaen jokseenkin välttämätöntä. Tyvifunktion korjaus siis pyrittiin toteuttamaan tyvifunktion muotoparametrien ja näitä selittävien mallien parametrien uudelleen laskennalla.

Tyvifunktion korjausta ajatellen on vähintäänkin pohtimisen arvoista, mitä määritelmällistä läpimittaa tyvifunktion tulisi tuottaa. Puutavaran mittauslaissa tarkoitettussa mittauksessa suure todellinen kuorellinen kiintotilavuus vastaa määritelmällisesti upotustilavuutta. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että erityisesti männyn tyviosassa esiintyvät kaarnankolot eivät määritelmätasolla sisältyisi todelliseen kuorelliseen kiintotilavuuteen. Tyvifunktion pitäisi kuitenkin kuvata tyviosan kuorellista ehjäkuorista tilavuutta. (Laki puutavaran mittauksesta 2013; Maa- ja metsätalousministeriö 2013)

Tyvifunktion korjauksessa lähdettiin siitä, että tyvifunktion on tuotettava sellaisia läpimittoja, että oletamalla tyviosan poikkileikkaus täydelliseksi ympyräksi, päästään tilavuuden laskennassa todenmukaisiin, upotustilavuutta vastaavaan kuorelliseen tilavuuteen. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että tyvifunktio tuottaa pääsääntöisesti pienempiä läpimittoja kuin mihin saksimittauksella päädyttäisiin. Tyvifunktion korjaustarpeesta osa johtui tästä periaatteellisesta erosta tarkastella

asiaa. Lämpimitan mittausaineiston perusteella korjatun tyvifunktion tilavuusero upotustilavuuteen oli noin +5 prosenttia kaikilla järeyksillä.

Metrologisen vertailtavuuden kannalta tyvifunktion korjaustarpeen ja korjauksen määräitys oli puutteellinen. Tyvifunktion korjaustarpeen määräitys vertaamalla tyvifunktion perusteella määritettyä tilavuutta upotustilavuuteen kertoi sen, että tyvifunktion tuottamissa läpimitoissa on kalibrointitarve. Koejärjestelyn perusteella ei kuitenkaan pystytty varsinaisesti *kalibroimaan* tyvifunktion tuottamia läpimittoja, siis määrittämään läpimitan ja oikeana pidettävän läpimitan poikkeamaa. (Mittausepävarmuus 2013)

Tyvifunktioiden taustalla olevien runkokäyrämallien (Laasasenaho 1982) tutkimusaineistot perustuvat saksimittauksella koepuiden suhteellisilta korkeuksilta mitattuihin läpimittoihin. Tutkimusaineisto oli kerätty vuosina 1968–1972 valtakunnan metsien inventoinnissa alueellisella satunnaisotannalla, jossa otannan perusjoukkona olivat kaikki Suomen männyt, kuuset ja koivut. Tutkimusaineisto koostui 2362 männystä, 1864 kuusesta ja 863 koivusta. Runkokäyrien laadinta-aineistossa oli mukana myös parisataa pienikokoista, rinnankorkeusläpimitaltaan alle kymmenen senttimetrin mäntykoepuuta. Voidaan olettaa, että tuolloin metsiköiden hakkuutavat, ikä, syntytapa ja käsittelyhistoria erosivat nykyisestä siinä määrin, että runkojen tyviosan muoto on saattanut muuttua. Muutoksen mahdollisuutta tukee varauksin tässä tutkimuksessa tehty havainto tyvifunktiolla määritettyjen ja metsässä mitattujen läpimittojen eroista.

Tyvifunktion korjauksen vaikutus sillä määritettyyn tyviosan tilavuuteen (V_{130}^{tf}) oli pienillä noin 50 litran rungoilla ($d_{1,3}$ noin kymmenen senttimetriä) noin –8,5 prosenttia ja suurilla noin 1750 litran rungoilla ($d_{1,3}$ noin 45 senttimetriä) noin –2,9 prosenttia. Kun tyviosan tilavuuden muutos suhteutetaan koko rungon tilavuuteen, ovat vastaavat osuudet noin –2,3 ja –0,4 prosenttia. Korjauksen vaikutus erikokoisilla rungoilla on tarkemmin esitetty Luonnonvarakeskuksen määräyksen perustelumuistiossa (Luonnonvarakeskus 2015).

Tyvifunktion korjauksen kokonaisvaikutusta arvioitiin suuntaa-antavasti suhteuttamalla eri järeysluokkien puiden tilavuusmuutos vuosittaisiin männyn hakkuukertymääräarvioihin. Hakkuukertymääräarviot perustuvat vuosina 2004–2008 toteutuneeseen hakkuuiden tasoon ja VMI10-inventoinnissa vuosina 2004–2008 kerättyihin koeala-aineistoihin (Salminen ym. 2013). Hakkuukertymääräarvioissa männyn vuotuiseksi kokonaishakkuukertymäksi vuosien 2007–2017 osalta ennustettiin 24,5 miljoonaa kuutiometriä. Kokonaishakkuukertymälle esitetyillä järeysluokkien painotuksilla tyvifunktion korjauksen vaikutus vastaisi noin yhden prosentin vähennystä männyn kokonaistilavuuteen.

Männyn tyvifunktion mahdollinen korjaustarve havaittiin aluksi käytännön mittaustoiminnassa. Kuusen ja koivun osalta vastaavia havaintoja ei ole tiedossa.

Kirjallisuusluettelo

- Ahonen O.-P., Marjomaa J. (1994). Hakkuukonemittauksen tarkkuus. Metsätehon katsaus 10/1994. 10 s. <http://www.metsateho.fi/hakkuukonemittauksen-tarkkuus/>.
- Ala-Ilomäki J. (1993). Yksioteharvesterin mittaustarkkuuden riippuvuus rungon ominaisuuksista. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 450. 44 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1275-5>.
- Gjerdrum P., Nitteberg M. (2001). Nøyaktighet ved måling i hogstmaskin. Skogforsk, Norsk institutt for skogforskning. Oppdragsrapport 8–9/01. Ås, Norge. 34 s.
- Kärkkäinen M. (1984). Puutavaran mittauksen perusteet. Helsingin yliopiston monistuspalvelu. 252 s. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:bib:me:I00476074300>.
- Laasasenaho J. (1982). Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. Seloste: Männyn, kuusen ja koivun runkokäyrä- ja tilavuusyhtälöt. Communicationes Institute Forestalia Fennica 108:1–74. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-0589-9>.

- Laki puutavaran mittauksesta 2013. Suomen säädöskokoelma N:o 414/2013, muutokset N:o 566/2014 ja N:o 725/2016. <https://finlex.fi/fi/laki/smur/2016/20160725?search%5Btype%5D=pika&search%5Bpika%5D=725%2F2016>.
- Lindblad J., Antikainen J., Wall T. (2013). Mittausmenetelmien erot männyn tyviosan tilavuuden mittauksessa. Metsäntutkimuslaitoksen työraportteja 303. 19 s. + liitteet 2 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-40-2488-7>.
- Luonnonvarakeskus (2015). Perustelumuiotio. Luonnos Luonnonvarakeskuksen määräykseksi puutavaran mittaukseen liittyvistä yleisistä muuntoluvuista annetun Metsäntutkimuslaitoksen määräyksen 1/2013 muuttamisesta. 29.9.2015. Puutavaranmittauksen neuvottelukunta. 26 s.
- Maa- ja metsätalousministeriö (2013). Maa- ja metsätalousministeriön asetus puutavaran mittauksen mittausmenetelmäryhmien ja mittausmenetelmien tarkemmasta sisällöstä sekä mittauslaitteiden käytöstä. Asetus Nro 12/13. 17.6.2013. <https://www.finlex.fi/data/normit/41198/13012fi.pdf>.
- Melkas T. (2018). Puutavaran mittausmenetelmien osuudet vuonna 2017. Metsätehon tulosalvosarja 6a/2018. http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tuloskalvosarja_2018_6a_Puutavaran_mittausmenetelmien_osuudet_2017.pdf.
- Metsäntutkimuslaitos (2012). Hakkuukonemittauksessa käytettävien tyviprofilifunktioiden muutostarpeen määrittäminen. Metsäntutkimuslaitoksen lausunto puutavaranmittauksen neuvottelukunnalle. 8.6.2012. 514/62/2012. 21 s.
- Metsäntutkimuslaitos (2013). Metsäntutkimuslaitoksen määräys puutavaran mittaukseen liittyvistä yleisistä muuntoluvuista. Määräys Nro 1/2013. 27.6.2013. Viranomaisten määräyskokoelma. https://www.finlex.fi/data/normit/41201/Metsantutkimuslaitoksen_maarays_puutavaran_mittaukseen_liittyvista_yleisista_muuntoluvuista_FI_27062013.pdf.
- Mittausepävarmuus (2013). SFS-käsikirja 40. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 702 s.
- Möller J., Arlinger J. (2007). Virkesvärdebest 2006 – mätnoggrannhet. Resultat från Skogsforsk Nr. 5/2007. Uppsala, Sverige. 4 s. <https://www.skogforsk.se/contentassets/7807e665cf0842f184e956afd1a3fdfa/resultat5-07-lowres.pdf>.
- Salminen O., Hirvelä H., Härkönen K. (2013). Valtakunnan metsien 10. inventointiin perustuvat ainespuun alueelliset hakkuumahdollisuusarviot. Metsätieteen aikakauskirja 3/2013: 199–268. <https://doi.org/10.14214/ma.6024>.

15 viitettä.