



Karelia-ammattikorkeakoulu
Tutkintonimike, Metsätalousinsinööri (AMK)

Hakkuupään sijaintitiedon tarkkuus

Eemeli Taipale

Opinnäytetyö, Joulukuu 2021

www.karelia.fi



OPINNÄYTETYÖ
Joulukuu 2021
Metsätalouden koulutus

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600

Tekijä
Eemeli Taipale

Nimeke
Hakkuupään sijaintitiedon tarkkuus

Toimeksiantaja
Metsäteho Oy

Tiivistelmä

Opinnäytetyössä selvitettiin hakkuupään sijaintitiedon tarkkuutta ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Hakattujen runkojen sijaintitiedolla on iso merkitys tulevaisuudessa metsävaratiedon luomisen ja päivittämisen kannalta. Sijaintitiedon on oltava kuitenkin tarpeeksi luotettavaa ja tarkkaa, jotta sitä voitaisiin hyödyntää. Hakkuupään paikan laskenta perustuu hakkuukoneen sijaintiin, koneen ja puomin kompassisuuntiin sekä puomin anturointiin jatkovartta lukuun ottamatta.

Tutkimuksessa kerättiin GNSS-tarkkuuspaikantimella noin 3 000 kannon sijainti-, läpimitta-, puulaji- ja ominaisuustiedot sisältävä maastoaineisto kahdelta harvennus- ja kahdelta päätehakkuukohteelta. Maastoaineisto yhdistettiin hakkuukoneen tallentamien sijaintitietojen kanssa ja pyrittiin löytämään vastinparit kannoille. Vastinparit löytyivät 2 216 kannolle, joille tuotettiin etäisyydet kolmella eri hakkuukonetiedoista saadulla hakkuupään paikkavaihtoehdolla, näitä olivat laskennallisesti tarkennettu hakkuupään sijainti, laskettu kouran sijainti, kun puomin pituutena käytetään vakioarvoa, sekä hakkuukoneen HPR- tiedostoihin tallentama hakkuupään sijainti.

Paikannustarkkuudessa parhaisiin tuloksiin päästiin laskennallisesti tarkennetulla sijainnilla. Parhaimmillaan koko aineistossa päästiin 7 cm:n tarkkuuteen ja keskimäärin 3,88 metriin. Paikannustarkkuuden vaihteluun löytyi korrelaatiota maasto-olosuhteiden, puulajien ja paikannuslaadun väliltä.

Kieli
suomi

Sivuja 55

Asiasanat
Metsäkoneet, hakkuukoneet, kaatopäät, paikannus, metsäteknologia



THESIS
December 2021
Degree Programme in Forestry

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600

Author
Eemeli Taipale

Title
Accuracy of The Location Data of Harvester Heads

Commissioned by
Metsäteho Oy

Abstract

The accuracy of the location data of harvester heads, and the factors affecting it, were investigated in the thesis. The location information of the felled logs will be of great importance in the future for creating and updating the forest resource data. However, the location information must be reliable and accurate enough to be used. The calculation of the position of the harvester head is based on the location of the harvester, the machine bearing and the boom angle, and the length of the boom, except for the extension arm.

In the study, field reference data was collected from two thinning and two final felling sites with GNSS-receiver containing information on the location, diameter, tree species and characteristics of about 3 000 stumps. The field data was combined with the harvester's location data and the aim was to find matching pairs for the stumps. Matches were found for 2 216 stumps for which distances were generated with three harvester head location options obtained from different harvester data. The options were the computationally refined harvester head position and the calculated harvester head position using a constant value for boom extension, and harvester head stored in HPR files.

In location accuracy, the best results were obtained with a computationally refined location. At best, the stem-wise accuracy was 7 cm and in average 3.88 meters. A correlation was found between terrain conditions, tree species and positioning quality and the increase in distance between the computationally refined harvester head position and reference location.

Language
Finnish

Pages 55

Keywords
Forest machinery, harvesters, feller heads, locationing, forest technology

Sisällys

1	Johdanto	7
2	Koneellinen puunkorjuu	8
2.1	Hakkuukone	8
2.2	Hakkuukone tiedonkerääjänä	9
2.3	Tiedonkeruun mahdollisuudet	10
3	Paikannustekniikka	15
3.1	Satelliittipaikannus	15
3.2	Tutkimus hakkuupään paikannustarkkuudesta	16
3.3	ASTA-metsätalouden GPS-dokumentointijärjestelmä	17
4	Tutkimuksen tavoitteet ja toteutus	18
4.1	Tutkimuksen tavoitteet	18
4.2	Tutkimusaineiston hankinta	19
4.3	Rungon sijaintien laskenta hakkuukoneaineistosta	21
4.4	Laskettujen runkojen yhdistäminen kantoreferensseihin	22
4.5	Varsinainen runkojen sijainnin osuvuuden analyysi	23
5	Tulokset	24
5.1	Kaikki korjuulohkot	24
5.1.1	Harvennus-1	27
5.1.2	Harvennus-2	30
5.1.3	Päätehakkuu-5	33
5.1.4	Päätehakkuu-7	36
5.2	Paikannustarkkuuteen vaikuttavat tekijät	39
5.2.1	Maasto-olosuhteet	39
5.2.2	Puulajit	41
5.2.3	Paikannuksen laatu	42
6	Pohdinta	45
6.1	Tulosten tarkastelu	45
6.2	Luotettavuus ja virhearviointi	50
6.3	Jatkotutkimus- ja kehitysideoita	51
	Lähteet	53

Sanasto ja lyhenteet

Ajoura	Metsäkoneen ura, jolta puut kaadetaan ja kerätään.
Avohakkuu	Päätehakkuutapa, jossa metsästä poistetaan lähes kaikki puusto lukuun ottamatta säästöpuita ja riistatiheiköitä.
GNSS	Global Navigation Satellite System, koko maailmaa palveleva satelliittipaikannusjärjestelmä.
GPS	Global Positioning System, USA:n puolustusministeriön ylläpitämä GNSS-järjestelmä.
Harvennushakkuu	Hakkuutapa, jossa poistamalla osa puista tehdään kasvutilaa jääville puille.
Hakkuukone	Metsäkone, joka kaataa, karsii ja katkoo puut metsässä haluttuun mittaan. Käytetään myös nimityksiä monitoimikone, moto tai harvesteri.
Hakkuupää	Puomin päässä oleva laite, jolla puunrungon käsittely tapahtuu. Käytetään myös nimityksiä hakkuulaite, harvesteripää tai koura.
HPR- tiedosto	Uuden StandForD2010-standardin mukainen hakkuukoneen tuotantotiedosto. Vanhassa standardissa vastaavat tiedot löytyvät PRD- ja STM-tiedostoista.
Jatkovarsi	Metsäkoneen kuormaimen viimeinen osa, jonka pituutta ohjataan työskentelyn aikana.
Kaukokartoitus	Satelliitti- ja ilmakuvien avulla tapahtuvaa maanpinnan havainnoimista.
Keskihajonta	Keskimääräinen etäisyys tulosten keskiarvosta.
Keskivirhe	Tulosten keskimääräinen virhe
Koela	Tutkimusta varten muodostettu tutkittava ala.
Laserkeilain	Lasersäteisiin perustuva mittauslaite, jolla tuotetaan kolmiulotteista tietoa kohteesta.
Leimikko	Metsähakkuilla käsiteltävä/käsitelty alue.
Mediaani	Tulosten keskimäinen luku suuruusjärjestyksessä.

Metsävaratieto	Metsiköstä kerättyä paikkaan sidottua tietoa kasvupaikasta, puustosta, monimuotoisuudesta, erityispiirteistä, toimenpide-ehdotuksista ja -historiasta.
P-arvo	Tilastollisen testin laskema arvo, joka kertoo todennäköisyyden sille, että havaittu poikkeama voidaan selittää pelkästään otantavirheellä.
PDOP-arvo	Position Dilution of Precision on arvo, joka kuvaa satelliittien sijaintien jakauman tasaisuutta taivaalla.
Päätehakkuu	Uudistushakkuu eli jaksollisen metsänkasvatuksen viimeinen vaihe, jota seuraa metsän uudistaminen.
Referenssisijainti	Tarkkuuspaikantimella mitattu sijaintitieto.
StanForD-2010	Metsäkoneiden uusi, xml-pohjainen tiedonvälitysstandardi
Säästöpuu	Puu, joka jätetään hakkuussa pystyyn turvaamaan metsän monimuotoisuutta.
THP- tiedosto	Total harvested production, Hakkuukoneen mittaus- ja tiedonsiirtojärjestelmän tallentama tiedosto, joka sisältää yhteenlasketut tilavuudet ja runkojen kokonaismäärät leimikon aloituksesta raportointihetkeen.
Topografia	Maan pinnanmuotoja kuvaava käsite.
T-testi	Tilastollinen testi, joka kertoo kahden ryhmän keskiarvojen eron tilastollisen merkitsevyyden.

1 Johdanto

Suomen metsissä työskentelee päivittäin noin 2 000 hakkuukonetta, jotka keräävät tietoa hakatuista puista hakkuukoneen mittaus- ja tietojärjestelmään. Puutavara mitataan ja katkotaan tilaajan toivomiin pituuksiin hakkuukoneella yleensä jo metsässä. Puustosta mitattavaa tietoa on tähän mennessä käytetty pääasiassa puukauppojen ja urakointien maksun perusteena sekä puunhankinnan ohjauksessa. Automatisoitujen tiedonkeruumenetelmien laajentamisella voitaisiin saada enemmän hyötyä metsissämme työskentelevistä koneista hidastamatta kuitenkaan niiden toimintaa. (Laitinen & Hämäläinen 2021.)

Hakkuukoneella kaadettujen puiden paikantaminen on isossa osassa automaattisten tiedonkeruumenetelmien laajentamista ja tarkentamista. Puukohtaista sijaintitietoa pystyttäisiin hyödyntämään esimerkiksi metsävaratietojen päivittämisessä ja luomisessa, kaukokartoituksen aputietona, hakkuukuvioiden, ajourien ja erityiskohteiden rajauksissa, puukasojen paikkatietona metsätraktorille sekä leimikon ja suojavyöhykkeiden rajoilta poistettavissa puissa.

Hakkuupään keräämän sijaintitiedon hyödyntäminen vaatii kuitenkin dataa, jonka tarkkuus säilyy riittävänä myös vaikeissa olosuhteissa. Viimeisimmässä tutkimuksessa päästiin noin 4,9 metrin keskimääräiseen tarkkuuteen, mutta tutkimuksessa otanta oli vielä melko pieni olosuhteiden vaihtelun kannalta (Melkas & Rieki 2017). Tässä tutkimuksessa selvitettiin hakkuupään sijaintitiedon tarkkuutta laajemmalla operatiivisella leimikkotason aineistolla kuin aiemmin. Suuremman otannan ansiosta tuloksiin saatiin enemmän vaihtelua ja päästiin tutkimaan paikannustarkkuuden vaihtelua hakkuutapojen, maasto-olosuhteiden, puulajien ja paikannuksen laadun välillä.

2 Koneellinen puunkorjuu

2.1 Hakkuukone

”Hakkuukone on metsäkone, joka kaataa, karsii ja katkoo puut metsässä haluttuun mittaan. Hakkuukoneesta käytetään myös nimityksiä monitoimikone, moto tai harvesteri.” (Ovaskainen 2012.) Hakkuukoneet voidaan jakaa neljään eri kokoluokkaan, jotka ovat pienet harvennuskoneet, harvennuskoneet, yleiskoneet ja päätehakkuukoneet. Suurimmalla osalla koneista voidaan työskennellä kaikissa hakkuukohteissa, mutta luokilla haetaan vain niiden ihanteellisimpia työskentelyolosuhteita. (Uusitalo 2012.)



Kuva 1. Komatsu hakkuukone. Kuvaan merkitty puun käsittelyssä käytettyjen osien nimet (Kuva: Metsäteho).

Hakkuukone käsittelee puut kuormaimen päässä olevan hakkuupään (myös hakkuulaite tai koura) avulla. Kuormaimen ulottuvuus Suomessa käytetyissä koneissa on yleensä noin 10 metriä, jonka ansiosta metsää voidaan harventaa 20 metrin leveydeltä yhdeltä 4–5 metriä leveältä ajouralta. Puun kaataminen hakkuukoneella tapahtuu asettamalla hakkuupää puun tyvelle, jossa se ottaa rungosta kiinni kouralla ja tekee kaatosahauksen ketjusahan avulla. Kaadettu

puunrunko kulkee hakkuupään lävitse syöttörullien toimesta, jonka aikana puun oksat karsiutuvat pois kulkiessaan karsintaterien lävitse. Hakkuukoneen mittausautomaatiikka ohjaa katkontaa ja tekee kuljettajalle katkontaehdotuksia optimaalisista pituuksista, joiden perusteella kuljettaja tekee lopullisen päätöksen. Yleensä katkontaehdotuksista poiketaan vain, kun puussa on laatuviikaa, esimerkiksi lahoa tai lenkoutta, minkä kuljettaja havaitsee silmämääräisesti. (Uusitalo 2012.)

2.2 Hakkuukone tiedonkerääjänä

Hakkuukone mittaa rungon osien pituudet yhden senttimetrin tarkkuudella karsinnan ja katkontan aikana hakkuupäässä sijaitsevan runkoa vasten pyörivän mittapyörän avulla. Rungon läpimitan mittaaminen tapahtuu mekaanisesti puunpintaa vasten olevien karsintaterien ja syöttörullien avulla, joihin on asennettu läpimita-anturit. Läpimita mitataan yhden millimetrin tarkkuudella kuoren pinnasta ja se tallentuu koneen järjestelmään 1–10 senttimetrin välein. Rungon osien tilavuudet lasketaan pituuden ja läpimittojen perusteella käyttäen lieriön tai katkaistun kartion kaavaa pois lukien tyvipölkyn tyviosa. Tyviosan tilavuus määritetään 1,3 metrin korkeudesta mitatun läpimitan perusteella tyviprofiilifunktioiden- ja taulukoiden avulla. Viimeisen rungonosan tilavuus saadaan laskettua toteutuneen pituuden perusteella. Hakkuukone-mittauksen hyväksyttävä mittaustarkkuus on ± 4 %. (Melkas 2018.)

Hakkuukonemittaus on yleisin puutavaran työ-, urakointi- ja luovutusmittausmenetelmä Suomessa. Sen osuus pystykauppojen mitatusta puumäärästä vuonna 2020 oli 85,0 %. Hankintakaupoissa hakkuukonemittauksen osuus 35,6 % on kasvanut lievästi viimeisen kolmen vuoden aikana. (Melkas 2021)

Hakkuukoneen kaatamien puiden mittaustiedot tallentuvat tuotantotiedostoihin (HPR- ja THP tiedostot), joista tieto saadaan siirrettyä luettavaan muotoon koneen tietojärjestelmään. Nykyisen StanForD 2010 -standardin mukaiseen HPR- tiedostoon pystytään poistettujen runkojen mittatietojen lisäksi tallentamaan hakkuukoneen sekä hakkuupään sijainti kaatohetkellä. Leimikon

valmistuttua hakkuukoneen kuljettaja pystyy lähettämään raportin hakkuusta vastaaville tahoille. (Räsänen 2019.)

Lähes kaikki hakkuukoneet on varusteltu kartta- ja paikannusjärjestelmillä, joiden avulla koneen sijainti pystytään määrittämään parhaimmillaan jopa 2–3 metrin tarkkuudella (Melkas & Visala 2009). Lisäksi voidaan laskea koneen kompassisuunnan, puomin kulman ja puomin anturoinnin avulla hakkuupäälle sijainti, jonka avulla voidaan tallentaa runkojen sijainnit (Melkas ja Riekkö 2017).

2.3 Tiedonkeruun mahdollisuudet

Hakkuukoneet tallentavat nykyisin enimmäkseen runkokohtaista hakkuukoneen sijaintia. Hakkuukoneen keräämä sijaintitieto on tärkeä lähtötieto laskennallisille sovelluksille, jotka ovat esimerkiksi osa Metsätehon kehittämää metsätiedon palvelualustaa. Sen on tarkoitus toimia yhtenäistettyjen toimintojen sijaintialustana sekä tietolähteiden yhdistäjänä. Kyseisen alustan varaan pystytään tulevaisuudessa rakentamaan erilaisia metsätietoa hyödyntäviä sovelluksia. Alustan tiedonkeruusta vastaavat koneen omat mittajärjestelmät, joita pystytään täydentämään asentamalla koneisiin erilaisia antureita sekä laserkeilaimia, joiden avulla saadaan tietoa kerättyä laajemmin. (Seppälä ym. 2021.)

Tulevaisuudessa hakkuukoneella pyritään keräämään automatisoidusti metsiköstä puustotiedot, uratiedot, vauriotiedot, kantokäsittelyyn ja kestävyysliittyviä tietoja (FSC, PEFC). Toimivalla tietojen yhdistämisjärjestelmällä voitaisiin tuottaa hyötyä metsäyhtiölle, koneyrittäjälle ja koneenkuljettajalle työnlaadun palautteen ja raportoinnin muodossa. Lisäksi metsänomistajille ja metsävaratiedoista vastaaville tahoille saataisiin raportoitua tietoa tehdyistä toimenpiteistä sekä tulevaisuudessa myös pystyyn jäävästä puustosta. Automaattisesti kerätyt tiedot vähentäisivät kaikkien tahojen tietotarpeiden manuaalista keräämistä, joka olisi kustannustehokkaampaa kuin nykyisillä menetelmillä. (Ovaskainen 2019.)

Hakkuukuvioiden, säästöpuuryhmien sekä muiden erikoiskohteiden automaattinen rajojen muodostaminen onnistuu hakkuukoneen sijaintitiedon

perusteella. Menetelmää kokeiltaessa on saatu lupaavia tuloksia sen tarkkuudesta ja hyödyntämisestä metsävaratietojen ajantasaistamisessa. (Melkas, Rieki & Sorsa 2018.) Esimerkiksi Suomen metsäkeskus on ottamassa käyttöön KAATO- laskentapalvelua, joka tuottaa hakkuukonetiedoista hakattujen kuvioiden rajaukset. Hakkuupään sijaintitiedon avulla pystyttäisiin jatkossa parantamaan rajauksen tarkkuutta erityisesti pienemmissä luontokohteissa, kuten säästöpuuryhmissä ja hakkuun ulkopuolelle jäävissä erikoiskohteissa (Melkas ym. 2020.)

Puustosta tavoitteena on raportoida lähtöpuuston, poistuman ja jäävän puuston tunnuksat. Lähtöpuuston raportoitavia tunnuksia ovat mm. keskiläpimitta, keskipituus, rungon keskitilavuus, runkoluku, puulajien osuudet, pohjapinta-ala ja tilavuus. (Seppälä ym. 2021.) Lähtöpuuston tunnuksat pystytään laskemaan Metsäkeskuksen laserkeilauksella ja ilmakuvauksella tuotettujen metsävaratietojen avulla. Suomen metsät ilmakuvataan kolmen ja laserkeilataan 6 vuoden välein. Kaukokartoituksen tukena tehdään maastossa koealamittauksia sekä kerätään tietoja myös muista tietolähteistä kuten esimerkiksi hakkuukonetiedot ja eri toimenpiteistä saadut raportit. (Metsäkeskus 2021.)

Kaukokartoituksella pystytään tuottamaan tasalaatuisempaa tietoa kuin maastoarvioinnilla, kun mittauksen tarkkuus ei vaihtele tekijän mukaan. Maastoarvioinnin kokonaistilavuuden keskivirhe vaihtelee 15–20 %:n välillä. Laserinventoinnilla päästään samaan tai jopa tarkempaan tulokseen kasvatus- ja uudistuskypsissä metsissä, joissa kokonaistilavuuden tarkkuusvaatimuksena on 20 % kahdeksalla kuviolla kymmenestä. Nuoremmissa ja normaalista poikkeavissa metsissä kaukokartoituksen tarkkuus muuttuu epäluotettavammaksi ja vaatii enemmän tukea muista tietolähteistä. (Metsäkeskus 2021.)

Poistumasta raportoitavia tunnuksia ovat mm. keskiläpimitta, keskipituus, rungon keskitilavuus, poistuman runkoluku puulajeittain, puulajien osuudet, hakattu pohjapinta-ala, poistuman tilavuus sekä poistettujen puiden sijainnit. Poistuman puustotunnuksat saadaan hakkuun jälkeen hakkuukoneen HPR-tiedostosta, joka sisältää rungon käyttöosan läpimitta- ja pituustiedot. (Seppälä ym. 2021.) Pituus tiedetään ainoastaan käyttöosan osalta, joten kannon ja

latvan laskemiseen voidaan käyttää esimerkiksi Laasasenahon (1982) runkokäyräfunktiota. Rungoista on tallennettuna myös hakkuukoneen sijainti, josta voidaan laskea tarkempi rungon sijainti koneen- ja puomin suuntien sekä puomin pituuden avulla. Runkokohtaista sijaintia tarvitaan, jotta voidaan muodostaa rungoista puukartta. (Melkas ja Rieki 2017.)

Jäävän puuston tunnuksista tarvitaan keskiläpimitta, keskipituus, rungon keskitilavuus, runkoluku, puulajien osuudet, pohjapinta-ala ja tilavuus. Jäävän puuston laskeminen tapahtuu lähtöpuuston ja poistumatiетоjen avulla. Tunnukset lasketaan koostamalla hakkuukuviolle kaukokartoitukseen perustuva metsävaratieto, josta vähennetään hakkuukoneen HPR- runkotietoihin tallentuneet runkokäyrillä lasketut kuvion poistumatiेतodot. Menetelmää ei ole kuitenkaan vielä testattu laajemmalla tasolla, koska metsävaratiedon tarkkuus vaihtelee, joka heikentää menetelmän lopullista tarkkuutta. (Seppälä ym. 2021.)

Ruotsalainen Skogforsk on kehittänyt harvennushakkuiden seurantaan, kuljettajien tueksi ja metsävaratietojen päivittämiseen HPRGallring-nimisen ohjelman. Järjestelmän algoritmi laskee tunnukset jäävän puuston tilavuudelle, pohjapinta-alalle, pohjapinta-alalla painotetulle rinnankorkeusläpimitalle, runkoluvulle, yläläpimitalle ja site-indeksille. Laskenta perustuu harvennuksilla ajourilta ja niiden väliltä poistettujen puiden tunnuksiin, joiden avulla lasketaan jäävän puuston tunnuksia. Järjestelmä helpottaa kuljettajan työskentelyä välittämällä tietoa hakkuukohteesta ja leimikkotunnuksista. Puustotunnuksien laskennassa käytetään kolmea säätöparametria, jotka ovat harvennusvoimakkuus, harvennussuhde ja yläläpimitan ja pohjapinta-alan välinen suhde harvennuksen jälkeen. Vertailussa referenssimittauksiin on menetelmällä päästy 5–12 %:n virhemarginaaliin muiden paitsi runkoluvun osalta, jonka virhe oli 21 %:n luokkaa. Järjestelmästä on ollut haastattelujen perusteella hyötyä myös kuljettajille ja se on toiminut kokeiluissa teknisesti hyvin. Metsävaratietojen päivittämisen kannalta on myös saatu positiivisia tuloksia järjestelmän toimivuudesta. Metsävaratiedon laskennassa käytetään menetelmää, jossa harvennusalue jaetaan ruutuihin, joihin sitten tallennetaan kaadettujen puiden sijainnit HPR- tiedostojen perusteella. Kaadettujen puiden sijaintien laskentaan on käytetty hakkuukoneen sijaintia sekä koneen- ja puomin suuntia. (Hannrup, Bhuiyan & Möller 2011; Hannrup, Möller & Bhuiyan. 2016 viitattu Ovaskainen 2019.)

Tulevaisuudessa puustotunnusten keräämiseen voitaisiin myös käyttää hakkuukoneeseen lisälaitteena asennettuja kameroita, jotka kuvaavat ympärillä olevaa puustoa, kuten esimerkiksi Trestima tekee (Ovaskainen 2019). Trestima on puhelimeen tai tablettiin tarkoitettu kuvaussovellus, joka tunnistaa automaattisesti puulajit ja laskee metsiköstä puulajikohtaiset perustunnukset, kuten pohjapinta-alan, runkoluvun, keskiläpimitan, keskipituuden ja tilavuuden (Trestima 2021).

Ajourilta kerättäviä tietoja ovat ajouratiheys, ajouraleveys, ajouraväli ja urien osuus hakattavasta pinta-alasta. Näistä kaikki paitsi ajouraleveys ovat tuotettavissa nykyisen hakkuukoneen paikannusdatan perusteella. Ainoa rajoittava tekijä on paikantimen tarkkuus, joka ei ole riittävällä tasolla kaikissa vanhemmissa koneissa. Ongelma kuitenkin korjaantuu tulevaisuudessa, kun konekanta uudistuu vähitellen. Ajouraleveys voidaan laskea runkokohtaiseen sijaintitietoon perustuvan puukartan avulla. Toinen tapa on asentaa metsäkoneeseen laserkeilain tai kamera, joka mittaisi etäisyyden ajouran reunoilla oleviin puihin. (Ovaskainen 2019.)

Mitattavia vauriotietoja ovat ajourapainauumat, juuristovauriot ja puustovauriot. Ajourasyvyyksien mittausta on kokeiltu asentamalla ajokoneeseen TOF-kamera tai 2D-laserskanneri, jotka ovat mitanneet koneenrungosta renkaiden kohdalta etäisyyttä maanpintaan. Molemmissa kokeiluissa on saatu tuotettua automatisoidusti käyttökelpoista aineistoa ajourapainaumien syvyydestä. Juuristo- ja juurenniskavaurioiden arvioiminen taas tuottaa enemmän haastetta, koska ne jäävät usein havujen alle piiloon eivätkä näy kuvissa. Vaurioiden syntymistä voitaisiin kuitenkin verrata pieneen ajouraleveyteen ja suureen kulkuvastukseen, joiden väliltä mahdollisesti löytyvän korrelaation avulla voitaisiin arvioida missä vaurioita on syntynyt. (Ovaskainen 2019.)

Puustovauriotietojen tuottaminen aiheuttaa eniten haasteita, koska ne syntyvät useimmiten puuta kaadettaessa ja vauriot syntyvät usein kaukaisempiin puihin tai puiden yläosiin, joita välttämättä hakkuukoneen kuljettajakaan ei huomaa heti syntyhetkellä. Puustovaurioiden arvioimisessa ainoa tapa ilman lisälaitteita on etsiä korreloivia tekijöitä niiden syntymisen kanssa, kuten normaalista työsyklistä eroavat ohjausliikkeet, normaalia suurempi poistettava runkolukumäärä tai liian kapeat ajourat. Vaurioiden varmemman todentamisen

avuksi on kokeiltu puuston kuvaamista metsäkoneeseen asennetun kamerasen avulla, jonka kuvista pystyttiin automaattisesti tulkitsemaan ajouralta näkyviä puustovaurioita onnistuneesti. Kuvaamisen avulla pystytään yhdistämään puustovaurioiden ominaisuudet ja niitä aiheuttavat leimikkotekijät, joiden avulla voidaan ennustaa kokonaisvaurioiden määrää. (Peltoniemi, Eronen, Palander, Ovaskainen, & Kärhä 2019.)

Hakkuukoneen keräämän tiedon automaattinen prosessointi ja tallennus laajemmin on nykyisten XML- pohjaista StanForD 2010-standardia noudattavien tietojärjestelmien ansiosta toteutettavissa ilman erillisjärjestelyjä. Automatisoitu tiedonsiirto metsäyhtiön metsäjärjestelmään on helpoin toteuttaa, jos vastaanottavan osapuolen tietojärjestelmät tukevat XML- pohjaista StanForD 2010-standardia. Tiedonvälitys ulkopuolisiin järjestelmiin voi taas vaatia tarvittavien tiedonsiirtorajapintojen toteuttamista. Hakkuukonetiedon siirron toimintamalliin kuuluisi automaattinen henkilötietojen sekä puutavaralajeja ja katkontaa kuvaavien tietojen poisto, minkä jälkeen hakkuun loput tiedot yhdistyisivät pilvipalvelupohjaisessa metsätietoalustassa lohko- ja kuviotietoihin sekä esimerkiksi vastaanotto- ja tukkiröntgenin mittaustuloksiin. (Räsänen ym. 2019.)

Haasteita tunnusten automaattiseen tiedonkeruuseen tuo kuitenkin se, että lisättävät mittalaitteet sisältävät yleensä herkästi hajoavaa teknologiaa, joka ei ole hyvä asia haasteellisessa maastossa kulkevan koneen kanssa. Toisena haasteena on se, että kuljettajien osaamisen pitäisi riittää laitteiston käyttöön sekä häiriöiden korjaamiseen. Koneyrittäjän ei myöskään ole kovin kannattavaa keskeyttää työpäiväänsä anturivikojen takia, joten dataan voisi jäädä paikoitellen aukkoja laitteiden vikaantuessa. (Ovaskainen 2019.)

3 Paikannustekniikka

3.1 Satelliittipaikannus

GNSS (Global Navigation Satellite Systems) on maailmanlaajuisesti toimiva useaan satelliittijärjestelmään perustuva paikannusjärjestelmä. Sen toiminta perustuu satelliittien havaittuihin etäisyyksiin. Satelliittien etäisyyksiä voidaan mitata kahdella eri menetelmällä. Yksinkertaisemmin satelliitti voi lähettää koodia, josta lasketaan signaalin kulku-aika ja sen avulla etäisyys. Monimutkaisemmin taas vastaanotin voi laskea kantoaaltojen määrää ja pituuksia etäisyyden selvittämiseksi. (Poutanen 2016, 11–13.)

Perinteisempää koodia käytetään navigointikäyttöön tarkoitetuissa vastaanottimissa, kuten älypuhelimissa ja autonavigaattoreissa, joilla päästään noin yhden metrin tarkkuuteen. Kantoaalto-menetelmä taas painottuu parempiin ja kalliimpiin ammattilaisvastaanottimiin, joilla päästään parhaillaan senttimetrin tarkkuuksiin. Mitä useampi satelliitti paikannuksessa on käytössä, sitä tarkempaa se on. Minimissään kuitenkin tarvitaan kolme satelliittia, jotta pystytään määrittämään yksikäsitteisesti sijaintia ja neljä satelliittia vastaanottimen kellovirheen minimoimiseksi. (Poutanen 2016, 11–13.)

Ensimmäinen ja perinteisin satelliittipaikannusjärjestelmä on GPS (Global Positioning System), joka kehitettiin Yhdysvaltojen puolustusministeriön (DoD, Department of Defence) toimesta tarkoituksenaan hyödyntää sitä alun perin sotilaskäytössä. Ensimmäinen satelliitti Navstar 1 laukaistiin vuonna 1978, minkä jälkeen noin vuotta myöhemmin otettiin käyttöön ensimmäiset siirrettävät vastaanottimet. (Poutanen 2016, 19.) Täyden toimintakunnon GPS saavutti vuonna 1995, jonka jälkeen sen käyttö lähti kasvamaan (Vihavainen 2020).

GPS-järjestelmän rinnalla on ollut käytössä myös venäläinen GLONASS vuodesta 1993, Kiinalainen BeiDou, joka on järjestelmästä uusin ja se otettiin käyttöön 2020 sekä Eurooppalainen Galileo, joka otettiin käyttöön vuonna 2016. Galileo on järjestelmästä tarkin ja edistynein. Se lähettää satelliittisignaalia kahdella eri taajuudella ja tarjoaa lisäksi neljää erityispalvelua, joita ovat sijaintitiedon 20 senttimetrin tarkkuudella mahdollistava tarkkuuspalvelu HAS,

satelliitin oikeellisuudentodennuspalvelut OSNMA ja CAS, viranomaispalvelu PRS ja tuki maailmanlaajuiselle etsintä- ja pelastuspalvelulle SAR. (Vihavainen 2020). Satelliitteja järjestelmissä on GPS 30+2, GLONASS 23+3, BeiDou 44+5 (Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing 2021) ja Galileo 32+4 (European GNSS Service Centre 2021). Ensimmäiset numerot edustavat käytössä olevien satelliittien määrää ja jälkimmäiset käytöstä poissa olevia.

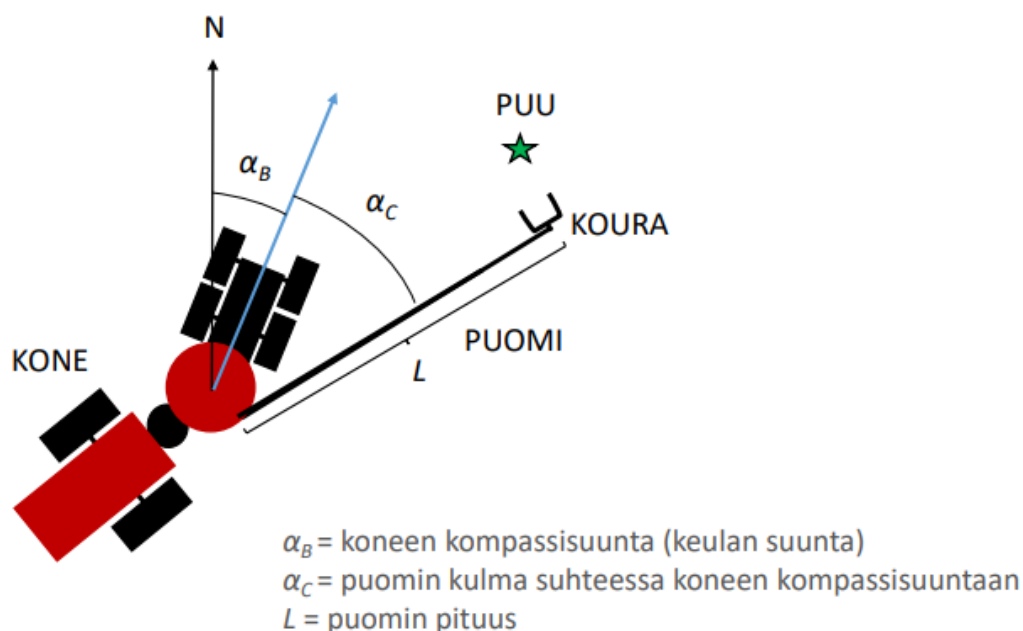
Edellä mainitut neljä järjestelmää ovat maailmanlaajuisia GNSS (Global Navigation Satellite System) satelliittipaikannusjärjestelmiä. Aiempien järjestelmien lisäksi on rakenteilla myös japanilainen QZSS ja intialainen IRNSS, jotka toimivat vain tietyillä alueilla. Kaikkien järjestelmien valmistuttua voidaan vastaanottimella päästä tulevaisuudessa yhteyteen jopa 50 satelliitin kanssa. Se vaatii kuitenkin jo tarpeeksi avointa paikkaa, koska satelliittien signaali ei kulje esteiden, kuten rakennuksien tai puiden lävitse. (Poutanen 2016, 11–13.) Useamman paikannusjärjestelmän samanaikainen käyttö vaatii myös tarpeeksi laadukasta vastaanotinta, jota ei esimerkiksi metsäkoneissa vielä nykyisellään ole käytössä.

3.2 Tutkimus hakkuupään paikannustarkkuudesta

Hakkuupään sijaintitiedon tarkkuudesta on tehty aiemmin kahdeksan metsikkökoealan laajuinen tutkimus Evon tutkimusmetsissä yhteistyössä Helsingin yliopiston, Hämeen ammattikorkeakoulun (HAMK), Komatsu Forest Oy:n, Metsäteho Oy:n ja sen osakkaiden yhteistyönä. Tutkimus oli osa Atte Saukkolan pro gradu -tutkielmaa sekä maa- ja metsätalousministeriön Metsätieto ja sähköiset palvelut -hanketta. Koealoista kuudelta hakattiin normaalisti 440 runkoa ja kahdelta koealalta 193 runkoa niin, että puomin jatkovarsi oli kiinni. (Melkas & Riekkö 2017.)

Tutkimuksessa hakkuukoneen puomi oli anturoitu jatkovartta lukuun ottamatta hakkuupään etäisyyden määrittämiseksi. Jatkovarren pituutena käytettiin vakioarvoa 1,65 metriä eli jatkovarren puoliväliä. Sijaintiedon tarkkuutta laskettiin vertaamalla puiden todellisia sijainteja hakkuukoneen keräämiin tietoihin. Paikannustarkkuutta saatiin parannettua aiemmissä tutkimuksissa

saavutetusta 8 metristä 6,7 metriin pelkästään kouran anturoinnin avulla. Metsäteho kehitti myös jälkilaskenta-algoritmin hakkuupään sijainnin tarkentamiseksi. Algoritmi käytti lähtötietoina hakkuukoneen HPR-tiedostoon tallentuneita muuttujia hakkuukoneen sijainnista, koneen kompassisuunnasta, kopin asennosta suhteessa koneeseen sekä puomin pituudesta (kuva 2). (Melkas & Riecki 2017.)



Kuva 2. Hakkuutilanteen geometria (Melkas & Riecki 2017, 5).

Lopputuloksessa päästiin jälkilaskennan avulla parhaillaan 3,6 metrin tarkkuuteen ja keskimäärin noin 4,9 metriin. Jatkovarren käyttämättömyydellä anturien keräämään sijaintitietoon parannusta saatiin 0,33 metriä verrattuna vakioarvon käyttöön normaalikäytössä. Tarkkuuden parantamiseksi pitäisi anturoida viimeinen jatkovarsi ja/tai vaihtaa koneen satelliittivastaanotin useita satelliittijärjestelmiä käyttäväksi. Tulosten perusteella arvioitiin myös, että tarkkuus voisi parantua isoilla koaloilla, kun leimikon aloituksia ja lopetuksia tehdään harvemmin. (Melkas & Riecki 2017.)

3.3 ASTA-metsätalouden GPS-dokumentointijärjestelmä

Suomalainen Risutec on kehittänyt ASTA-GPS-dokumentointijärjestelmän taimien- ja muokauspaikkojen sijaintien tallentamiseen. Järjestelmän avulla pystytään raportoimaan reaaliajassa kuljettajalle pinta-alat, istutustiheydet ja kappalemäärät kustannustehokkaasti. Tekniikka on tarkoitettu pääasiassa

alustakoneilla tehtävään istutukseen ja maanmuokkaukseen, mutta sitä mainostetaan kuitenkin sopivaksi kaikkiin metsässä liikkuviin koneisiin. Järjestelmän toiminta perustuu siihen, että puomin päähän asennetaan magneettiantenni, joka tallentaa sijainnin aina, kun kuljettaja käyttää valittua toimintoa. Järjestelmälle luvataan noin yhden metrin tarkkuutta, ja se voidaan yhdistää myös metsäkoneissa käytettävään Woodforce-toiminnanohjausjärjestelmään. (Risutec 2021.)

Vielä vaativampaan käyttöön löytyy paremmalla GPS-moduulilla varusteltu ASTA-ex. Järjestelmän tarkoitus on ohjeistaa kuljettajaa ennalta määritellyille geopisteille, joiden avulla voidaan optimoida maankäyttöä metsässä ja maastossa sekä tallentaa sijaintipisteet jatkokäyttöä varten. Järjestelmälle luvataan 1,5–80 senttimetrin tarkkuutta avoimilla paikoilla. ASTA-ex käyttää paikantamisessa apunaan korjaussignaalia, joten signaalin ollessa saatavilla päästään tarkkuudessa jopa 1,5 senttimetriin. (Risutec 2021.)

4 Tutkimuksen tavoitteet ja toteutus

4.1 Tutkimuksen tavoitteet

Hakkuupään sijaintitiedon tarkkuudesta on vasta vähän tutkimuksia ja tekniikkaakin on vielä melko tuoretta. Nykyinen sijaintitiedon tallennus hakkuukoneen HPR-tiedostoon ei ole käytössä kuin vasta osassa uudemmissa koneista. Tässä työssä käytetystä hakkuupään sijaintitiedon laskentamenetelmästä on tehty vasta yksi pienemmän otannan tutkimus, jossa selvitettiin keskimääräistä tarkkuutta muttei siihen vaikuttavia tekijöitä.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää nykyisen hakkuupään sijaintitiedon tarkkuutta laajemmalla operatiivisella leimikkotason aineistolla kuin aiemmin. Isommassa otannassa mukaan saatiin enemmän vaihtelua eri olosuhteissa ja voitiin vertailla merkittävimpiä paikannustarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä toisiinsa.

Hakkuupään sijaintitiedon tarkkuus saatiin selvitettyä paikantamalla kantojen oikeat sijainnit maastossa ja vertaamalla niitä hakkuukoneen tallentamien tietojen avulla laskettuihin paikkoihin. Tutkimuksessa hakkuupään paikkoina käytettiin Metsätehon HPR-tiedoista jälkilaskettua sijaintia, jossa oli hyödynnetty puomin anturointia viimeistä jatkovartta lukuun ottamatta, Metsätehon laskennasta saatua hakkuupään paikkaa, siten että puomin pituutena käytettiin vakioarvoa 7,68 metriä, sekä Komatsun hakkuukoneen laskemaa HPR-sijaintitietoa. Kaikissa laskentatavoissa sijainnin määrittämisen pohjana toimi hakkuukoneen sijainti, sekä koneen ja puomin kompassisuunta.

4.2 Tutkimusaineiston hankinta

Maastoaineistona käytettiin vuonna 2016 kerättyä Forest Big Data -leimikkoaineistoa, joka piti sisällään hakkuukoneen HPR-tiedostot seitsemältä leimikolta. Aineistosta pystyttiin hyödyntämään kahta päätehakkuu- ja harvennushakkuuleimikkoa. Lohkot nimettiin karttaliitteen mukaan harvennus-1 ja -2 sekä päätehakkuu-5 ja -7. Muilta leimikoilta ei päästy keräämään sijaintihavaintoja liiallisen vesakoitumisen tai ajankäytön rajallisuuden vuoksi.

Leimikoilta kartoitettiin kaadettujen puiden kantojen sijainti tarkkuuspaikantimella (kuva 3), puulaji, kannon läpimitta ristiinmittauksella sekä havainnot paikannustarkkuuteen oletettavasti vaikuttavista maasto-olosuhteista. Paikannustarkkuuteen vaikuttavia maasto-olosuhteita leimikoilla olivat katve (puusto tai topografia), aukea, mäki sekä huono satelliittigeometria.



Kuva 3. Kantojen sijaintien kartoittamisessa käytettiin Trimblen Geo7X GNSS-tarkkuuspaikanninta, mihin pystyttiin tallentamaan samalla myös muut havainnot.

Tavoitetarkkuutena kannoille pidettiin 10–30 senttimetriä, johon suurimmalla osalla kannoista päästiinkin. Kantojen paikannuksessa tavoitetarkkuuteen pääseminen vaati päätehakuilla keskimäärin 65–69 havaintoa ja harvennuksilla 96–99 havaintoa, mikä kuvaa hyvin sitä, kuinka paljon haastetta pystyyn jäävä puusto tuo myös hakkuukoneen paikannukseen. Tarkkuuspaikannin tallensi aina yhden havainnon per sekunti.

Kantoja saatiin mitattua kuukauden mittausjakson aikana yhteensä 2 966 kappaletta, joista 1 517 kappaletta harvennuksilta ja 1 449 kappaletta päätehakuilta. Aukoilla havaintojen kerääminen oli huomattavasti nopeampaa kuin harvennuksella, jossa niitä joutui ottamaan paljon pidempään. Kohteet valittiin niin, että saataisiin mahdollisimman yhtenäisiä otantoja ajourien mukaisesti kiinnostavista ja mahdollisimman vaihtelevista paikoista.

4.3 Rungon sijaintien laskenta hakkuukoneaineistosta

Hakkuupään sijainnin määrittäminen hakkuukoneen tallentamista tiedoista perustui lähtökohtaisesti töissä (Saukkola 2019; Melkas & Rieki 2017) esitettyyn menetelmään. Joitakin menetelmän yksityiskohtia on päivitetty sittemmin. Työssä käytetty päivitetty menetelmä on kokonaisuudessaan kuvattu lyhyesti alla.

Hakkuukoneen tallentamat StanFord 2010 -standardin (Skogforsk 2021) mukaiset HPR-tiedostot purettiin ja niistä saadut hakkuukoneen ja -laitteen sijaintia kuvaavat tai muut runkokohtaiset tiedot (korjuulohkon tunnistetiedot, puulaji, rungon dimensiot) tallennettiin tietokantaan.

Kantomittauksia tehtiin neljältä lohkolta, jotka on nimetty karttaliitteen mukaan lohkoiksi 1, 2, 5 ja 7. Kaksi ensimmäistä olivat harvennuksia ja kaksi viimeistä avohakkuuta. Korjuulohkojen rungot hakkuukonetiedoissa (ml. kaikki HPR-tiedostojen rungot hakatuilta alueilta) numeroitiin uudella runkotunnisteella ("UniqueStem"), koska esimerkiksi lohkolta 7 oli päällekkäin useita hakkuukoneen lohkoja, joilla kaikilla runkonumerointi alkoi alusta.

Tässä työssä tarvittavat hakkuulaitteen sijaintitiedot olivat: koneen sijainti (Long, Lat), koneen keulan kompassisuunta (MachineBearing), puomin pituus (BoomExtension) ja puomin suunta koneen hytin suhteen (BoomAngle). Lisäksi käytettiin erillisenä hakkuupään sijaintina valmiiksi laskettua paikkatietoa (Long, Lat), joka löytyy HPR-tiedostoista. Tietokannasta tuotettiin runkotiedoista .csv-tiedosto, joka vietiin paikkatieto-ohjelmaan.

Paikkatieto-ohjelmassa sijaintiaineistot projisoitiin aluksi ETRS-TM35FIN -koordinaatistoon. Kaikki hakkuukoneaineisto prosessoitiin korjuulohkoittain. Hakkuukoneen sijainnin paikannusvirhettä tasoitettiin laskemalla keskiarvoistettu hakkuukoneen sijainti. Hakkuukoneen sijaintien spatiaaliseen keskiarvoistukseen tarvittiin lohkojen yleinen paikannustarkkuus (tarkempi/epätarkempi), koska sen perusteella säädettiin keskiarvoistuksen voimakkuutta. Yleiset paikannustarkkuudet lohkoille kuvaavat hakkuukoneen paikantimen tarkkuustasoa korjuuolosuhteissa, ja ne laskettiin numeerisesti (Melkas ym. 2020).

Kaikkien tämän työn lohkojen paikannus oli numeerisen tuloksen perusteella tarkempi. Keskiarvoistuksen voimakkuutta säädettiin myös hakkuutavan perusteella. Päätehakkuilla keskiarvoistus oli hieman kevyempi kuin harvennuksilla. Käytetyt parametriarvot olivat samat kuin Riekin, Melkkaan, Ovaskaisen, Poikelan & Sorsan (2019) työssä, jossa näillä parametriarvoilla saatiin ajourille hyvä sijaintivastaavuus keskiarvoistuksessa. Siksi myös tässä työssä oletettiin, että arvot sopivat hyvin myös hakkuukoneen sijainnin arviointiin hakkuupään paikan laskemista varten.

Mikäli hakkuukoneen suunnaksi (MachineBearing) tallennetut arvot sisältävät suuria vaihteluja lähekkäin hakattujen runkojen välillä, tasoitetaan laskennallisesti hakkuukoneen suunnan arvot. Myös puomin jatkovarren anturoinnin puuttumista kompensoidaan lisäämällä puomin ulottumaan puolet jatkovarren keskimääräisestä liikkumisvarasta. Aineiston laskennallisten parantelujen jälkeen puomin kompassisuunta määritettiin hakkuukoneen keulan suunnan ja puomin kulman avulla. Tämän jälkeen sijoitettiin hakattu runko puomin etäisyyden päähän keskiarvoistetusta hakkuukoneen sijainnista puomin kompassisuunnassa ja saatiin hakatun rungon laskennallisesti korjattu sijainti selville.

Hakkuupään tarkennetut sijainnit laskettiin ensin yllä kuvatulla menetelmällä. Niitä käytettiin referenssirunkojen ja hakkuupään sijaintien vastinparien löytämiseen. Lisäksi laskettiin hakkuupään sijainnit käyttämällä vakio pituista puomia muuttuvan puomin pituuden sijaan, koska esimerkiksi HPRGallring -menetelmässä puomin pituutta ei käytetä. Tällöin keskiarvoistus ja suunnan tasoitus olivat muilta osin ennallaan. Puomin pituus oli 7,68 metriä eli sama vakioarvo, jota Komatsu tallentaa anturoimattomilla hakkuukoneilla HPR-tiedostoihin, kun koneessa on lyhyempi puomi.

4.4 Laskettujen runkojen yhdistäminen kantoreferensseihin

Hakkuupään lasketuille sijainneille etsittiin numeerisesti optimaalista sijaintia referenssisijainteihin nähden. Ilmeni, että hakkuukoneaineistossa on niin paljon paikallista vaihtelua hakkuupään sijainneissa, että koko sijaintipisteiden joukkoa ei saatu asemoitua tasossa optimikohtaan. Kokeiltiin myös puulajin, etäisyyden ja läpimitan käyttöä vastinrunkojen etsinnässä, ja se tuotti joitakin vastinpareja.

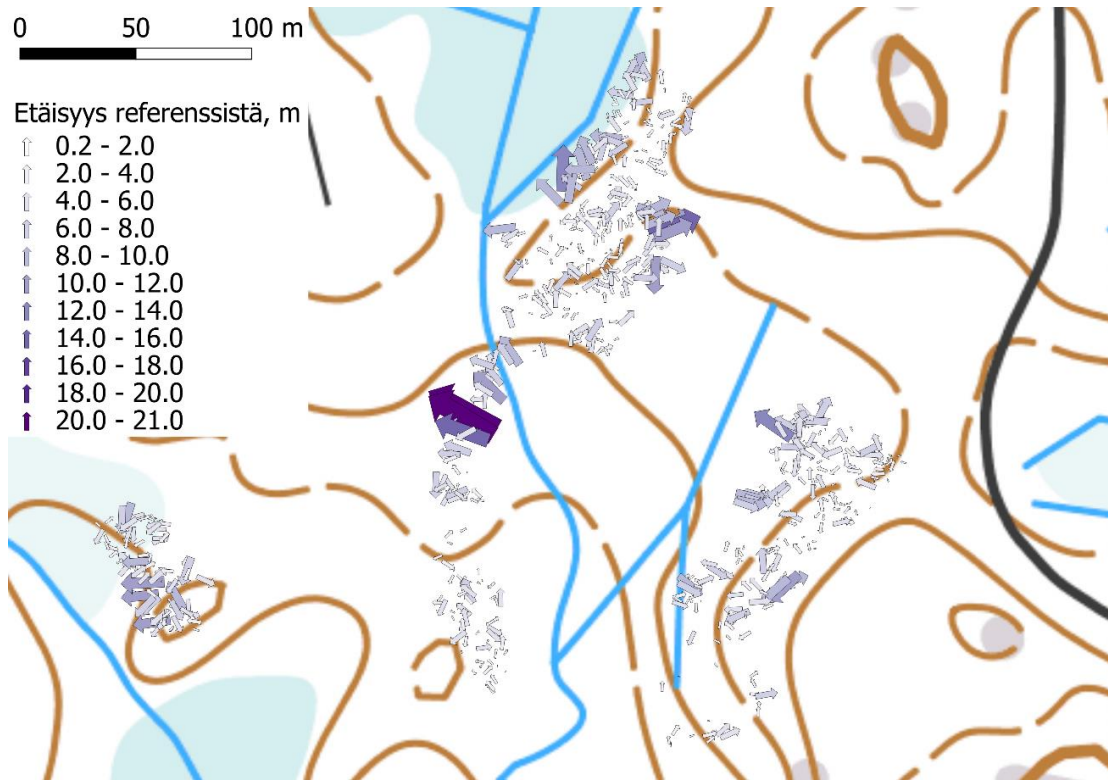
Osa niistä oli tosin vääriä vastinpareja, mikä selvisi läpikäydessä aineistoa silmämääräisesti. Siten oli varmintä yhdistää vastinrungot toisiinsa manuaalisesti.

Runkokohtaiset lisätiedot (puulaji, kannon keskimääräinen läpimitta, hakkuukoneen mittaama läpimitta rungolta 1,3 metriä kaatoleikkauksesta ylöspäin, runkonumero/hakkuujärjestys ym.) olivat suureksi avuksi yhdistämisessä ja varmensivat vastinparien kohdistusta hyvin. Keskiarvoistuksesta ja suunnan laskennallisesta tasoituksesta aiheutuu myös toisinaan virhettä. Sen vuoksi erityisesti ajourien päissä käytettiin runkojen yhdistämisessä apuna myös laskennallisesti korjaamatonta aineistoa, eli pelkästään HPR-tiedoston koneen kompassisuunnan, sekä puomin suunnan ja pituuden avulla määritettyjä hakkuupään sijainteja.

Etäisyydet mitattiin paikkatieto-ohjelmassa yhdistettyjen vastinparien sijaintien väliltä, käyttämällä yksilöivää runkotunnistetta. Samalla määritettiin myös suunta, johon hakkuupään laskettua sijaintia pitäisi siirtää mitatun etäisyyden verran, jotta ne olisivat samassa kohti. Etäisyydet tuotettiin kolmelle eri hakkuukonetiedoista saadulle hakkuupään paikkavaihtoehdolle, jotka ovat tarkennettu hakkuupään sijainti, laskettu kouran sijainti, kun puomin pituutena käytetään vakioarvoa, sekä hakkuukoneen HPR- tiedostoihin tallentama hakkuupään sijainti.

4.5 Varsinainen runkojen sijainnin osuvuuden analyysi

Korjuulohkoilta rajattiin yhteensä 23 koealaa erilaisten maastossa todettujen olosuhteiden mukaisesti. Rajauksessa hyödynnettiin korjuulohkoilta paikkatieto-ohjelmalla tehtyjä etäisyyskarttoja (kuva 3), mikä varmensi visuaalisesti koealojen tarkempaa rajaamista maasto-olosuhteisiin nähden runkokohtaisten tarkkuuksien perusteella. Kannoista onnistuttiin yhdistämään 2 216 kappaletta ja yhdistämättä jäi 741 kappaletta. Hakkuukoneen mittaamia kantoja koealoilla oli kokonaisuudessaan jälkilaskennan perusteella noin 3 620 kappaletta, joista maastomittauksissa paikannettiin tutkimusta varten 2 957 kappaletta.



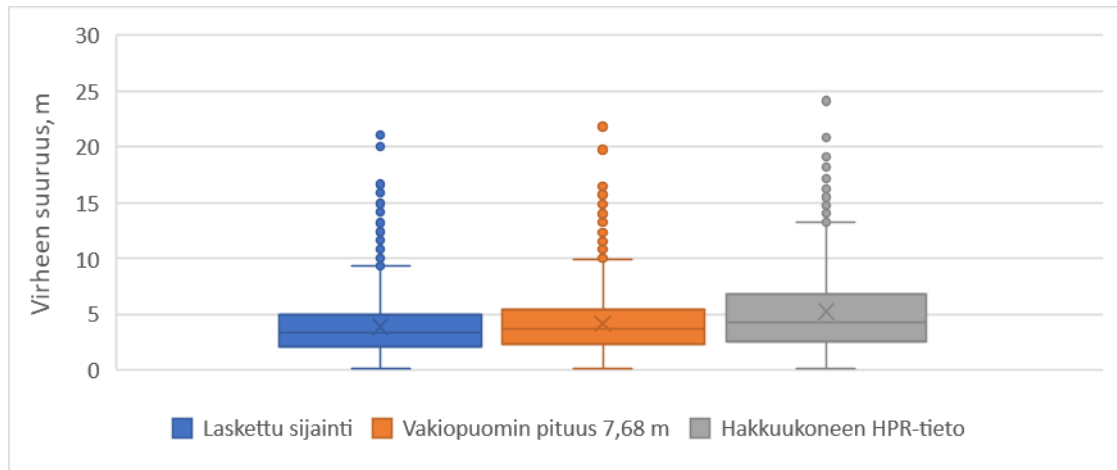
Kuva 4. Esimerkki päätehakkuu-7 etäisyyskartasta, jota hyödynnettiin koealojen tarkemmassa rajauksessa.

Koealojen rajaamisen jälkeen kannoista tuotettiin Excel-taulukot, josta löytyi kantokohtaisesti koordinaatit, kohdeluokitukset, maastossa määritetty lisämääre, puulaji ja kantoläpimitta, tarkkuuspaikantimen tiedot, etäisyystieto referenssisijaintiin, hakkuukoneen paikannus- ja runkotiedot, koealatieto yms. Näiden tietojen perusteella lähdettiin vertailemaan keskivirhettä ja hajontoja eri määreiden ja sijainnin laskentatapojen välillä.

5 Tulokset

5.1 Kaikki korjuulohkot

Vertailussa on laskettu hakkuupään sijainti, laskettu kouran sijainti käyttämällä puomin vakio pituutena 7,68 metriä sekä hakkuukoneen HPR-tiedostoihin tallentama hakkuupään sijainti. Vertailussa lasketulla sijainnilla päästiin parhaaseen tarkkuuteen, jonka keskivirhe oli 3,88 metriä, puomin vakio pituudella 4,16 metriä ja hakkuukoneen HPR-tiedolla 5,20 metriä (kuvio 1). Otanta kattoi kaikkiaan 2 216 kantoa.



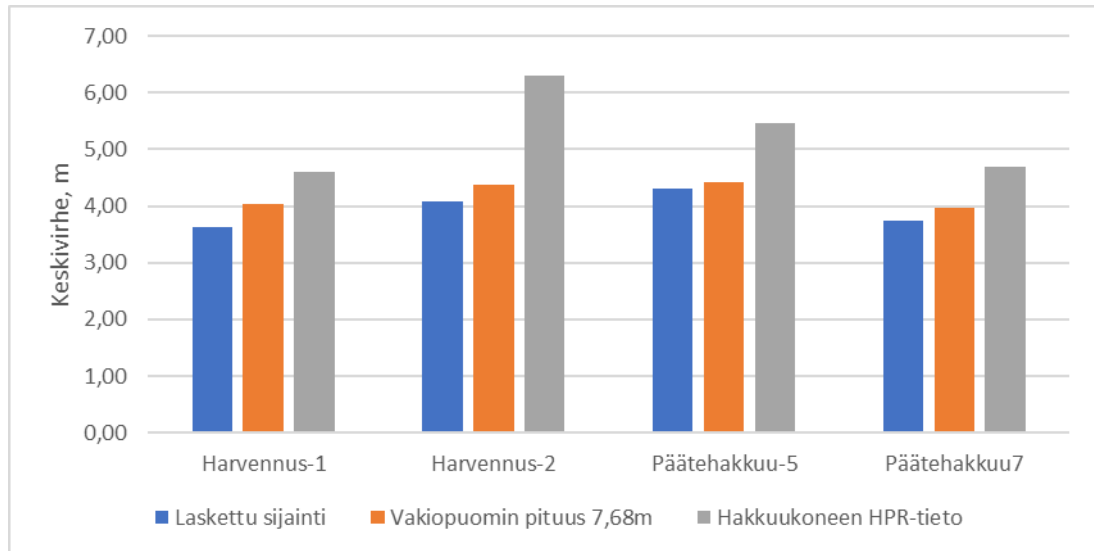
Kuvio 1. Kaikkien kantojen (n=2 216) vertailu eri laskentatapojen välillä. Kuviossa keskiarvot on merkitty raksilla, mediaanit keskiviivalla ja poikkeavat arvot eli arvot, jotka ovat 1,5 laatikon päässä laatikon reunasta on esitetty pisteinä. Laatikot kuvaavat keskimmäisiä neljänneksiä ja janat uloimpia.

Kaikkien kantojen paikannusvirheiden tunnuksat laskentatavoittain ovat taulukossa 1. Tuloksissa paikannusvirheet on esitetty metreinä seuraavien tunnusten avulla: keskiarve (virheiden keskiarvo), mediaani (virheiden keskimäinen arvo suuruusjärjestyksessä), keskihajonta (virheiden keskimääräinen etäisyys keskiarvosta), minimi (pienin virhe) ja maksimi (suurin virhe).

Kaikki korjuulohkot	Laskettu sijainti	Vakiopuomin pituus 7,68m	Hakkuukoneen HPR-tieto
Keskiarve, m	3,88	4,16	5,20
Mediaani	3,38	3,69	4,25
Keskihajonta, m	2,56	2,64	3,75
Minimi, m	0,07	0,10	0,12
Maksimi, m	21,03	21,81	24,10

Taulukko 1. Kaikkien korjuulohkojen paikannusvirheiden tunnuksat eri laskentatavoittain.

Korjuulohkojen keskiarveet eri laskentatapojen välillä on esitetty kuviossa 2. Keskiarve oli pienimmillään lasketulla sijainnilla harvennuksella-1, 3,62 metriä, harvennuksella-2, 4,08 metriä, sekä päätehakuulla-5, 4,3 metriä ja päätehakuulla-7, 3,74 metriä. Laskentatapakohtaiset paikannusvirheiden tunnuksat on esitetty taulukossa 2.



Kuvio 2. Korjuulohkojen keskvirheet eri laskentatavoittain.

Korjuulohko ja laskentatapa		Keskivirhe, m	Mediaani, m	Keskihajonta, m	Mini-mi, m	Maksi-mi, m	Otantata
H1	Laskettu sijainti	3,62	3,24	2,43	0,10	20,00	552
	Vakiopuomin pituus 7,68m	4,03	3,53	2,70	0,24	21,81	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	4,61	3,70	3,26	0,12	20,79	
H2	Laskettu sijainti	4,08	3,52	2,52	0,07	14,90	601
	Vakiopuomin pituus 7,68m	4,37	4,01	2,65	0,22	19,73	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	6,30	5,41	4,09	0,18	19,49	
P5	Laskettu sijainti	4,30	3,75	2,66	0,21	16,08	302
	Vakiopuomin pituus 7,68m	4,43	4,01	2,70	0,19	15,39	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	5,45	4,49	4,03	0,45	24,10	
P7	Laskettu sijainti	3,74	3,21	2,61	0,13	21,03	761
	Vakiopuomin pituus 7,68m	3,97	3,45	2,65	0,07	20,35	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	4,69	3,86	3,38	0,07	19,47	

Taulukko 2. Paikannusvirheiden tunnuksot korjuulohkoittain ja laskentatavoittain.

Lasketun sijainnin keskvirheiden eroja tarkasteltiin kahden riippumattoman otoksen t-testillä, jonka tuloksena saatiin p-arvot. P-arvo kertoo todennäköisyyden sille, että keskiarvojen ero johtuu pelkästään otantavirheestä. Testissä käytettiin rajana vakiintunutta 0,050 eli viiden prosentin suuruista raja-arvoa riittäväksi näytöksi sille, että keskvirheiden ero on tilastollisesti merkitsevä. Korjuulohkojen yli 25 cm:n suuruiset keskvirheiden erot olivat kaikki tilastollisesti merkitseviä (taulukko 3).

Korjuulohko	Harvennus-1	Harvennus-2	Päätehakkuu-5	Päätehakkuu-7
Harvennus-1				
Harvennus-2	0,002			
Päätehakkuu-5	< 0,001	0,229		
Päätehakkuu-7	0,387	0,016	0,002	

Taulukko 3. T-testien p-arvot korjuulohkojen keskivirheiden erojen tilastollisen merkitsevyyden tarkasteluun. Tilastollisesti merkitsevät arvot kirjoitettu lihavoituina.

5.1.1 Harvennus-1

Harvennus-1 on elokuussa 2016 harvennushakattu mäntyvaltainen leimikko, joka on kehitysluokaltaan varttunutta kasvatusmetsikköä. Leimikolta mitattiin kantoja tien varresta, jossa sijaitsi varastopaikka ja tietä kohti laskeva mäki. Lisäksi mitattiin kantoja pohjoisosasta, jossa on jyrkempi rinne ja ajourien pistoja, sekä eteläosasta, jossa on loivaa rinnettä. Koealat ja niiden ominaisuustiedot ovat esitettyinä kuvassa 5 ja taulukossa 4.

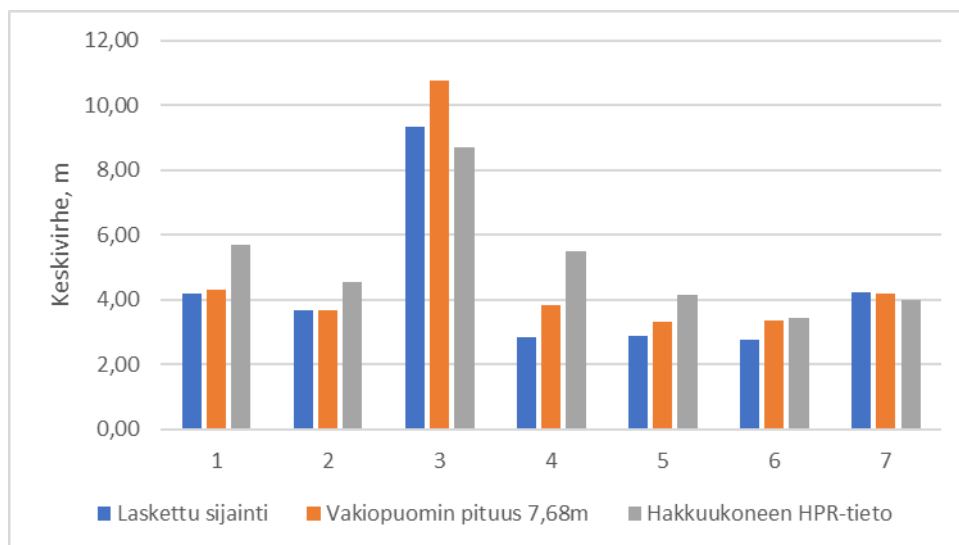


Kuva 5. Harvenus-1 koealakat.

Koeala	Otanta	Koealakuvaus
1	173	Rinne ja pistoja
2	119	Tienvierus, mäen alhaalla
3	40	Aloituskohda ja varastopaikka
4	96	Koneensuunta heittelee, pieni painauma
5	168	Avoin pääajoura, loiva mäki
6	194	Tasainen ura
7	115	Loiva rinne

Taulukko 4. Koealojen otannat ja kuvaukset.

Koealojen keskivirheet on esitetty kuviossa 3. Koealoilla parhaisiin tarkkuuksiin päästiin koealoilla 4–6, joilla keskivirhe lasketulla sijainnilla oli 2,76–2,87 metriä. Koeala-3 poikkesi eniten paikannustarkkuudessa, koska keskivirhe lasketulla sijainnilla oli 9,34 metriä. Laskentatapakohtaiset paikannusvirheiden tunnuksat on esitetty taulukossa 5.



Kuvio 3. Keskivirheet koealoittain eri laskentatapojen välillä.

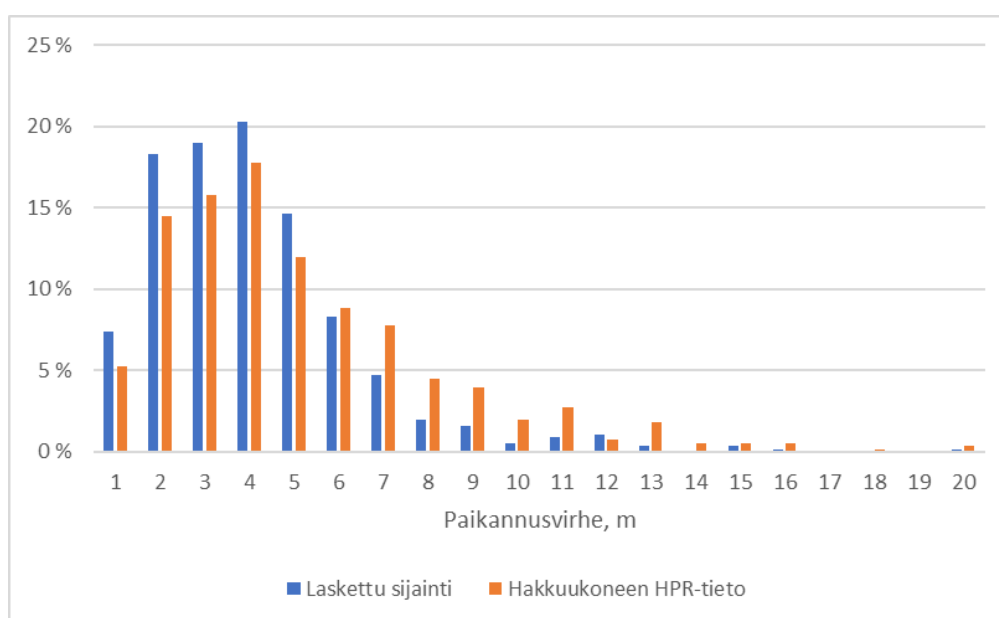
Koeala ja laskentatapa		Keskivirhe, m	Mediaani, m	Keskihajonta, m	Mini-mi, m	Maksi-mi, m	Otan-ta
1	Laskettu sijainti	4,19	3,66	2,36	0,49	11,73	92
	Vakiopuomin pituus 7,68m	4,29	4,02	2,55	0,27	12,83	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	5,68	4,47	3,81	0,82	20,79	
2	Laskettu sijainti	3,65	3,80	1,25	1,28	6,66	53
	Vakiopuomin pituus 7,68m	3,65	3,68	1,63	0,94	7,10	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	4,52	3,86	2,93	0,12	13,21	
3	Laskettu sijainti	9,34	9,48	4,37	1,17	20,00	25
	Vakiopuomin pituus 7,68m	10,78	11,08	4,59	2,37	21,81	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	8,70	9,68	4,71	1,57	19,17	
4	Laskettu sijainti	2,83	2,79	1,42	0,37	8,08	64
	Vakiopuomin pituus 7,68m	3,83	3,65	2,08	0,54	11,21	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	5,49	5,47	3,27	0,29	14,61	
5	Laskettu sijainti	2,87	2,61	1,68	0,10	8,05	113
	Vakiopuomin pituus 7,68m	3,29	3,10	2,05	0,26	10,55	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	4,13	3,69	2,67	0,39	15,20	
6	Laskettu sijainti	2,76	2,73	1,57	0,10	7,94	127
	Vakiopuomin pituus 7,68m	3,33	3,10	1,63	0,24	8,37	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	3,44	2,89	2,45	0,26	12,85	
7	Laskettu sijainti	4,23	4,12	2,24	0,52	11,69	78
	Vakiopuomin pituus 7,68m	4,20	4,21	2,39	0,57	12,09	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	3,97	3,34	2,55	0,65	13,40	

Taulukko 5. Paikannusvirheiden tunnukset koealoittain ja laskentatavoittain.

Koealojen keskivirheiden eroja tarkasteltiin t-testin avulla 95 %:n luottamustasolla. Koealojen välillä kaikki yli 60 cm:n suuriset keskivirheiden erot olivat tilastollisesti merkitseviä (taulukko 6). Lasketun sijainnin ja hakkuukoneen HPR-tiedon paikannusvirheistä tuotettiin kuvio 4, josta on hyvin havaittavissa sijainnin laskennan vaikutus eri tarkkuusluokkiin.

Koeala	1	2	3	4	5	6	7
1							
2	0,072						
3	< 0,001	< 0,001					
4	< 0,001	0,001	0,001				
5	< 0,001	0,001	0,001	0,866			
6	< 0,001	< 0,001	0,001	0,780	0,625		
7	0,914	0,060	0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	

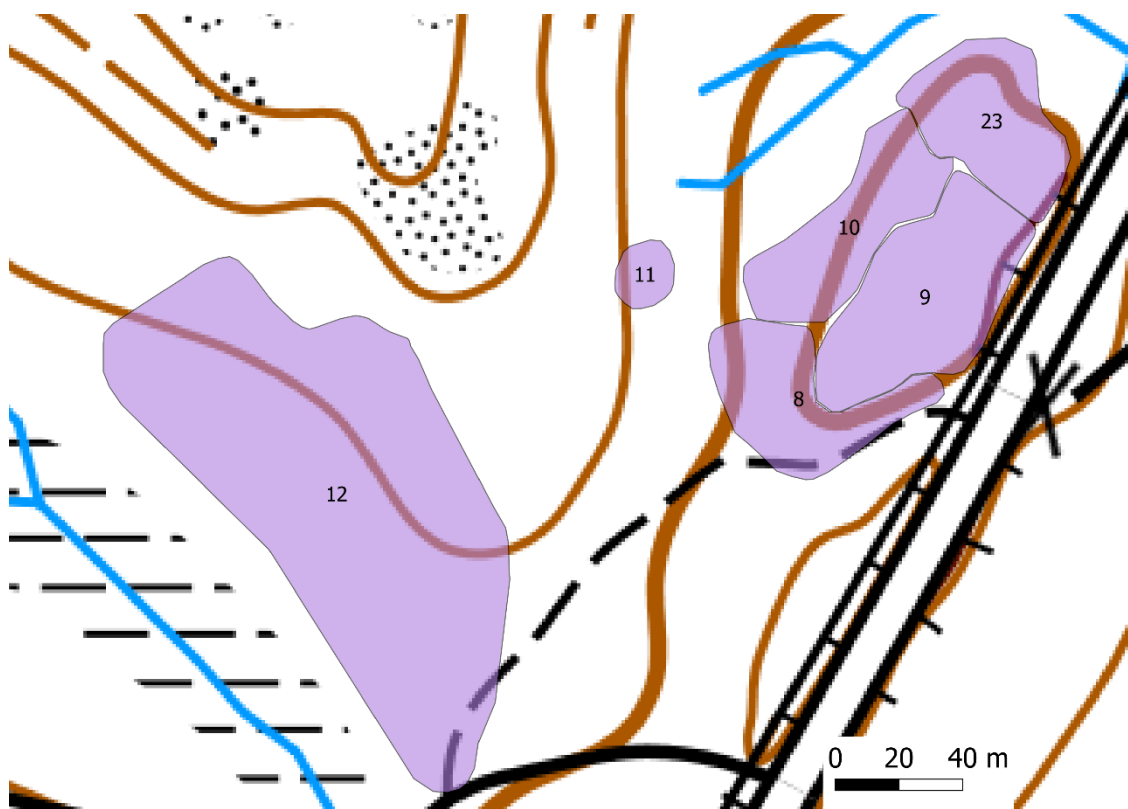
Taulukko 6. T-testien p-arvot koealojen keskivirheiden erojen tilastollisen merkitsevyyden tarkasteluun. Tilastollisesti merkitsevät arvot kirjoitettu lihavoituina.



Kuvio 4. Harvennus-1 lasketun sijainnin ja hakkuukoneen HPR-tiedon paikannusvirheiden jakauma.

5.1.2 Harvennus-2

Harvennus-2 on kesäkuussa 2016 harvennushakattu mäntyvaltainen leimikko, joka on kehitysluokaltaan varttunutta kasvatusmetsikköä. Kantojen sijainteja mitattiin pääasiassa kahdelta isolta alueelta: lounaisreunasta, joka on tasaista ja paikannuksen kannalta helppoa aluetta ja leimikon koillisreunassa, jossa on pientä korkeus- ja puulajivaihtelua sekä harjanne tienvarressa. Tasaisempi alue jätettiin yhdeksi isoksi koealaksi ja toinen alue jaettiin useaan koealaan. Lisäksi alueista erillään on pieni alue, joka jäi pieneksi kantojen vaikean löydettävyyden takia. Koealat ja niiden ominaisuustiedot ovat esitettyinä kuvassa 6 ja taulukossa 7.

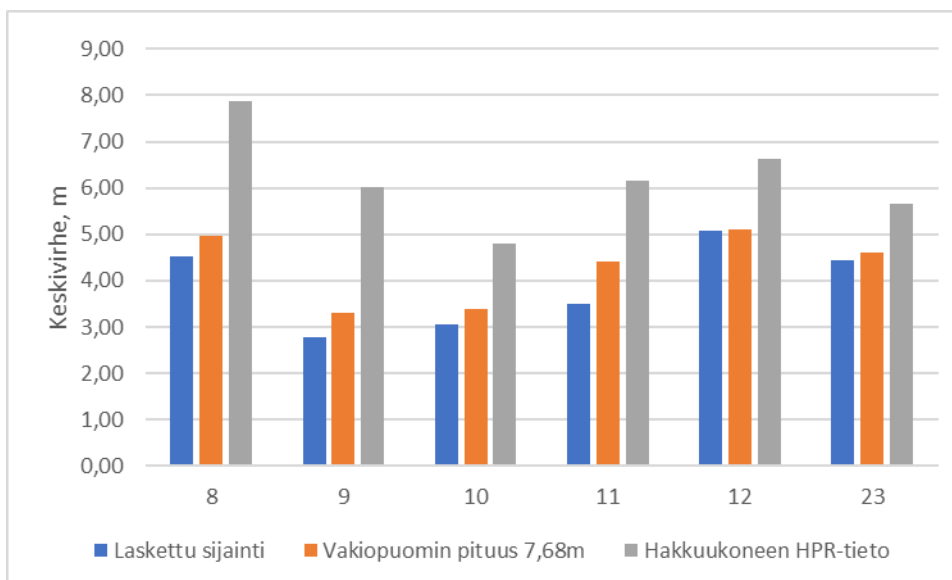


Kuva 6. Harvennus-2 koealakartha.

Koeala	Otanta	Koealakuvaus
8	95	Rinne ja katvetta metsätien reunassa
9	182	Männikkö, tienvarsi, mäen päällä
10	132	Kuusikko, mäen alla
11	22	Pieni alue, mäen alla
12	316	Loiva rinne sivuttais suunnassa ajouraan nähden
23	119	Sekalainen hakkuukoneen ajourasto

Taulukko 7. Koealojen otannat ja kuvaukset.

Koealojen väliset keskivirheet on esitetty kuviossa 5. Paras paikannustarkkuus oli koealalla-9, jossa keskivirhe oli lasketulla sijainnilla 2,78 metriä. Huonoin paikannustarkkuus oli isoimmalla koealalla-12, jossa keskivirhe oli lasketulla sijainnilla 5,08 metriä. Laskentatapaakohtaiset paikannusvirheiden tunnuksat on esitetty taulukossa 8.



Kuvio 5. Keskivirheet koealoittain eri laskentatapojen välillä.

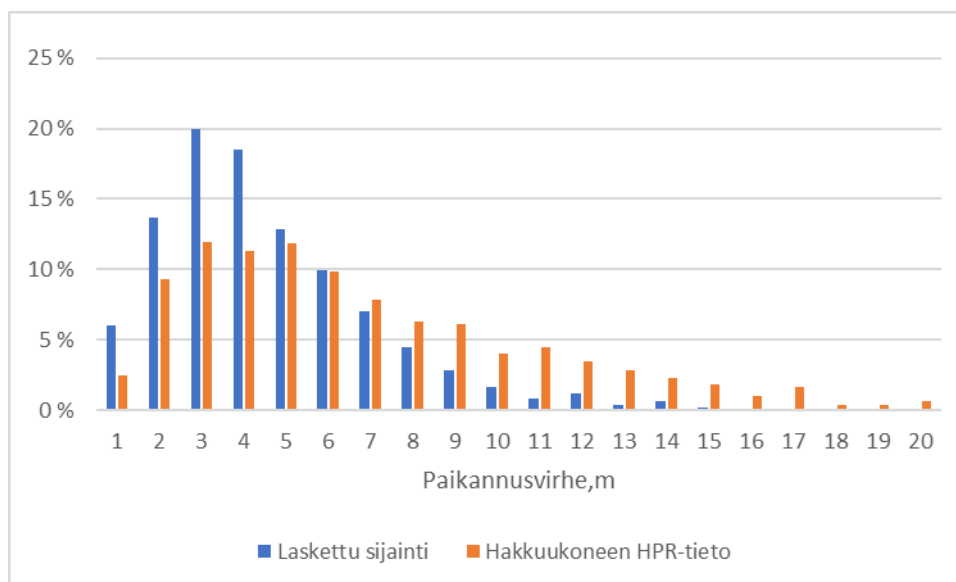
Koeala ja laskentatapa		Keskivirhe, m	Mediaani, m	Keskihajonta, m	Mini-mi, m	Maksi-mi, m	Otantata
8	Laskettu sijainti	4,51	3,97	2,67	0,70	13,80	85
	Vakiopuomin pituus 7,68m	4,97	4,48	2,84	0,22	13,34	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	7,88	6,89	4,59	1,08	19,49	
9	Laskettu sijainti	2,78	2,47	1,52	0,09	7,69	135
	Vakiopuomin pituus 7,68m	3,32	3,00	1,75	0,30	8,58	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	6,01	4,25	4,61	0,60	19,33	
10	Laskettu sijainti	3,05	3,03	1,51	0,22	9,67	90
	Vakiopuomin pituus 7,68m	3,39	3,17	1,70	0,37	9,49	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	4,81	4,10	3,66	0,18	19,08	
11	Laskettu sijainti	3,51	3,17	2,54	0,40	9,66	17
	Vakiopuomin pituus 7,68m	4,41	4,19	2,36	0,85	8,90	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	6,16	4,93	3,76	1,46	13,22	
12	Laskettu sijainti	5,08	4,54	2,79	0,20	14,90	224
	Vakiopuomin pituus 7,68m	5,11	4,53	3,08	0,30	19,73	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	6,62	6,17	3,44	0,66	16,85	
23	Laskettu sijainti	4,45	4,52	2,48	0,07	10,89	50
	Vakiopuomin pituus 7,68m	4,61	4,36	2,32	0,53	9,05	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	5,65	4,14	4,29	0,53	16,65	

Taulukko 8. Paikannusvirheiden tunnukset koealoittain ja laskentatavoittain.

Koealojen keskivirheiden eroja tarkasteltiin t-testin avulla 95 %:n luottamustasolla. Koealojen välisistä keskivirheiden eroista alle puolet olivat tilastollisesti merkitseviä. Testin perusteella koealojen-8 ja -11, jopa metrin ero johtuisi 15 %:n todennäköisyydellä pelkästä otantavirheestä (taulukko 9). Lasketun sijainnin ja hakkuukoneen HPR-tiedon paikannusvirheistä tuotettiin kuvio 6, josta on hyvin havaittavissa sijainnin laskennan vaikutus eri tarkkuusluokkiin.

Koeala	8	9	10	11	12	23
8						
9	< 0,001					
10	< 0,001	0,193				
11	0,157	0,260	0,475			
12	0,109	< 0,001	< 0,001	0,025		
23	0,882	< 0,001	0,001	0,186	0,115	

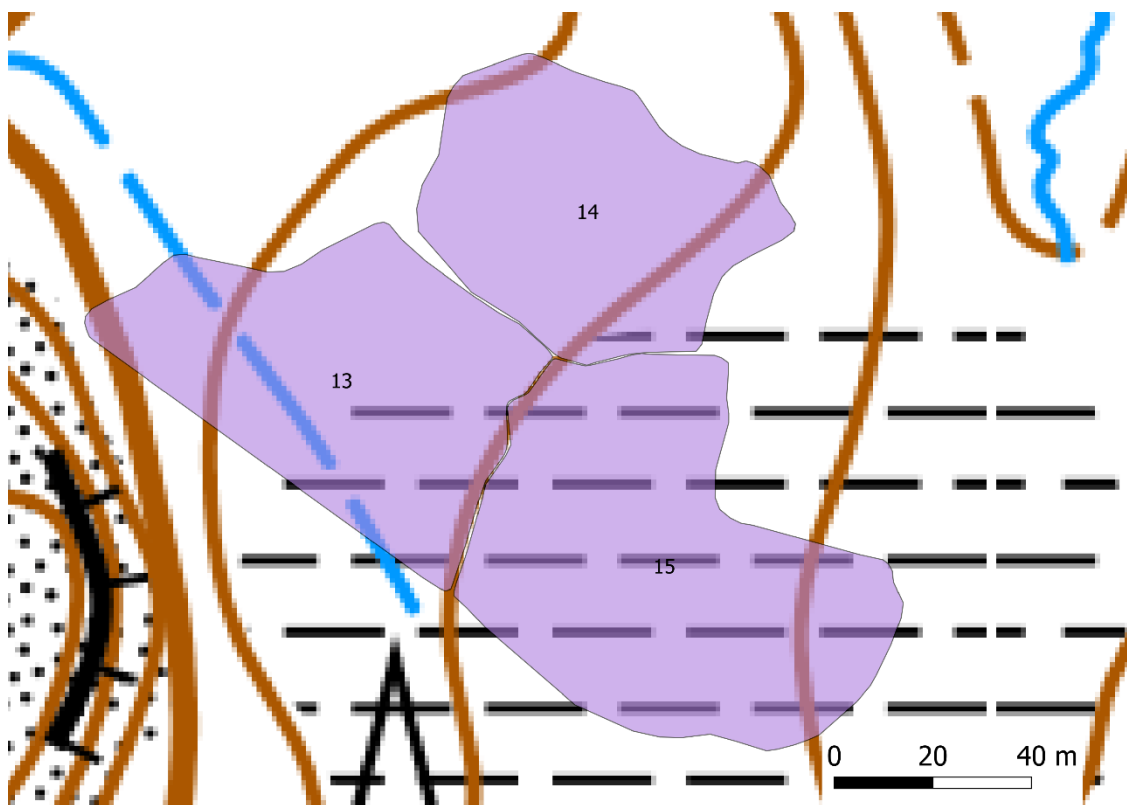
Taulukko 9. T-testien p-arvot koealojen keskivirheiden erojen tilastollisen merkitsevyyden tarkasteluun. Tilastollisesti merkitsevät arvot kirjoitettu lihavoituina.



Kuvio 6. Harvennus-2 lasketun sijainnin ja hakkuukoneen HPR-tiedon paikannusvirheiden jakauma.

5.1.3 Päätehakkuu-5

Päätehakkuu-5 on avohakkuuna elokuussa 2016 tehty kuusivaltainen leimikko. Leimikolta mitattiin kantoja yhdeltä isolta alueelta, joka jaettiin maastonmuotojen mukaan kolmeksi koealaksi. Paikannuksen kannalta koeala-13 on haasteellisin puuston ja topografian aiheuttaman katveisuuden takia. Koeala-14 taas on parhain alue korkeuden ja avoimuutensa puolesta. Koealat ja niiden ominaisuustiedot ovat esitettyinä kuvassa 7 ja taulukossa 10.

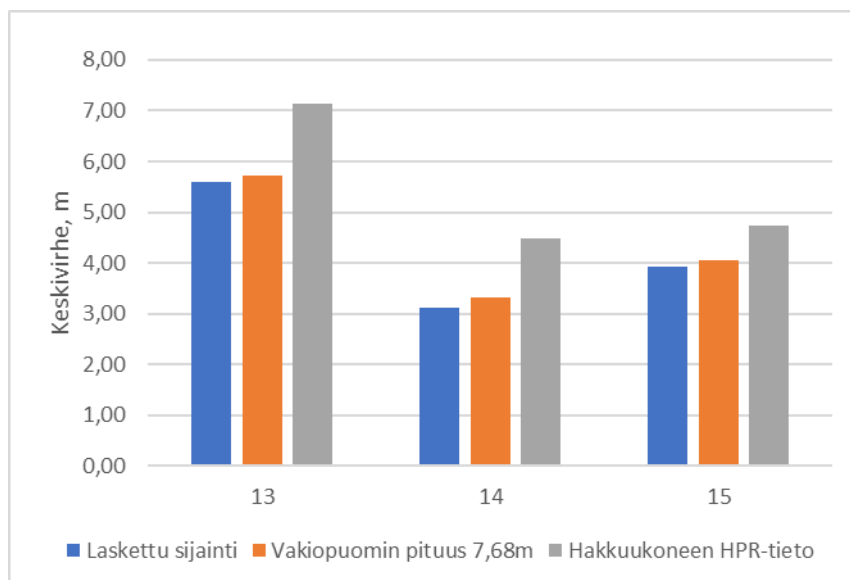


Kuva 7. Päätehakku-5 koealakartta.

Koeala	Otanta	Koealakuvaus
13	171	U-painanne
14	98	Mäen päällinen
15	250	Mäen alla tasaista aluetta

Taulukko 10. Koealojen otannat ja kuvaukset.

Koealojen väliset keskivirheet on esitetty kuviossa 7. Paras paikannustarkkuus oli koealalla-14, jossa keskivirhe oli lasketulla sijainnilla 3,12 metriä. Huonoin paikannustarkkuus oli koealalla-13, jossa keskivirhe oli lasketulla sijainnilla 5,61 metriä. Laskentatapa kohtaiset paikannusvirheiden tunnuksia on esitetty taulukossa 11.



Kuvio 7. Keskivirheet koealoittain eri laskentatapojen välillä.

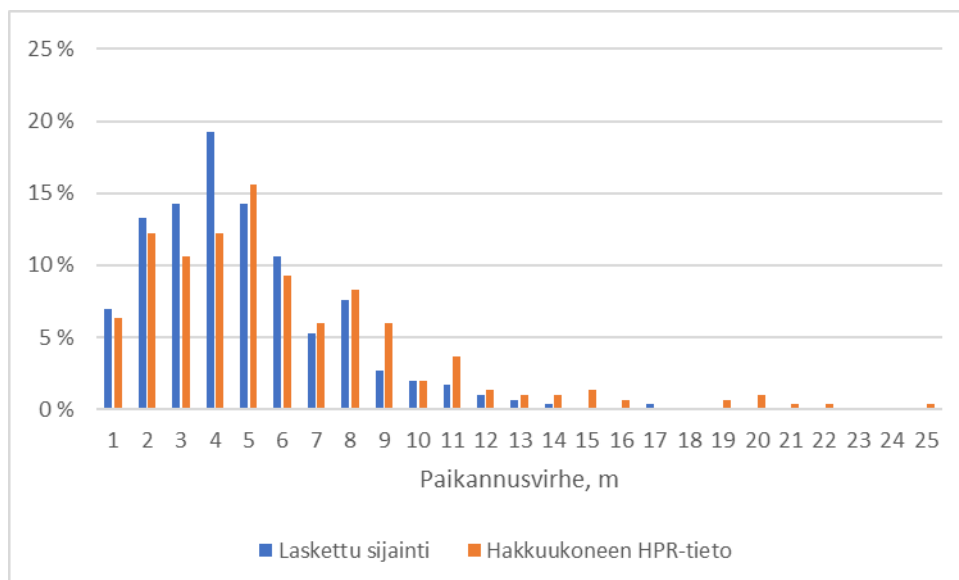
Koeala ja laskentatapa		Keskivirhe, m	Mediaani, m	Keskihajonta, m	Mini-mi, m	Maksi-mi, m	Otan-ta
13	Laskettu sijainti	5,61	5,09	2,92	1,17	16,08	97
	Vakiopuomin pituus 7,68m	5,72	5,11	3,05	1,00	15,39	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	7,14	6,16	4,15	0,96	21,10	
14	Laskettu sijainti	3,12	2,86	1,80	0,46	9,73	65
	Vakiopuomin pituus 7,68m	3,33	2,99	1,85	0,38	9,19	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	4,49	3,66	3,73	0,71	19,24	
15	Laskettu sijainti	3,94	3,66	2,44	0,21	12,36	140
	Vakiopuomin pituus 7,68m	4,05	3,79	2,43	0,19	11,89	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	4,73	3,98	3,75	0,45	24,10	

Taulukko 11. Paikannusvirheiden tunnuksot koealoittain ja laskentavoittain.

Koealojen keskivirheiden eroja tarkasteltiin t-testin avulla 95 %:n luottamustasolla. Koealojen väliset keskivirheiden erot olivat kaikki tilastollisesti merkitseviä (taulukko 12). Lasketun sijainnin ja hakkuukoneen HPR-tiedon paikannusvirheistä tuotettiin kuvio 8, josta on hyvin havaittavissa sijainnin laskennan vaikutus eri tarkkuusluokkiin.

Koeala	13	14	15
13			
14	< 0,001		
15	< 0,001	0,008	

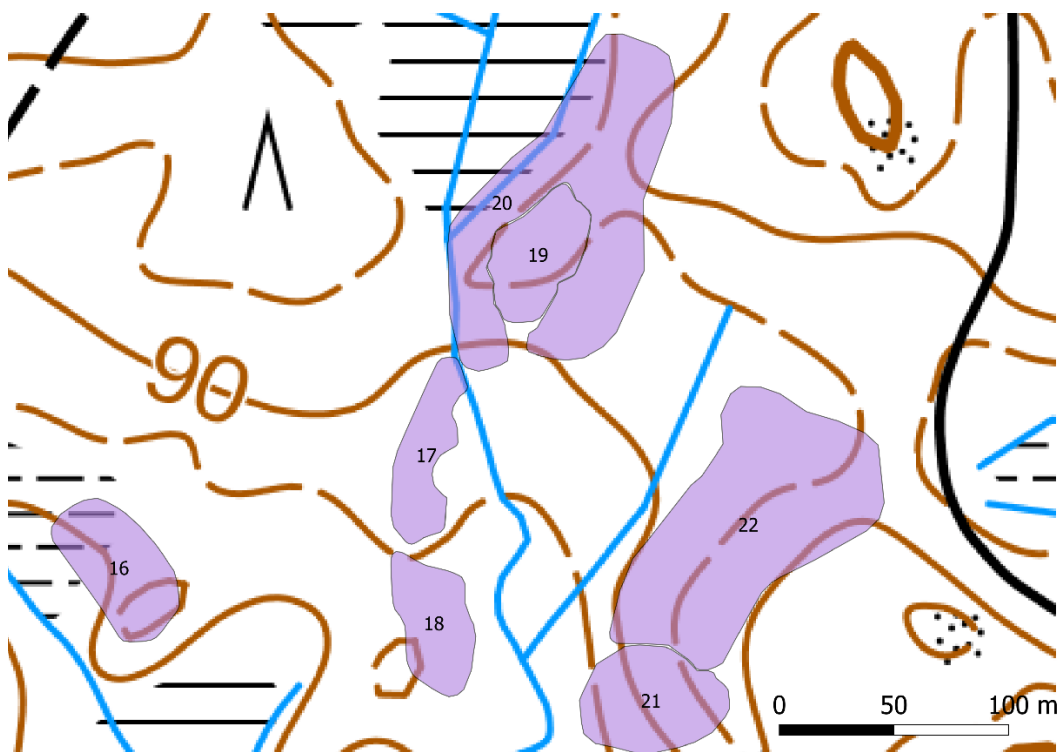
Taulukko 12. T-testien p-arvot koealojen keskivirheiden erojen tilastollisen merkitsevyyden tarkasteluun. Tilastollisesti merkitsevät arvot kirjoitettu lihavoituina.



Kuvio 8. Päätehakkuu-5 lasketun sijainnin ja hakkuukoneen HPR-tiedon paikannusvirheiden jakauma.

5.1.4 Päätehakkuu-7

Päätehakkuu-7 on avohakkuuna heinäkuussa 2016 tehty kuusivaltainen leimikko. Leimikolta mitattiin kantoja pääasiassa metsänreunoista, jotka jaettiin seitsemään koealaan niiden ominaisuuksien perusteella. Koealojen ja niiden ominaisuustiedot ovat esitettyinä kuvassa 8 ja taulukossa 13.

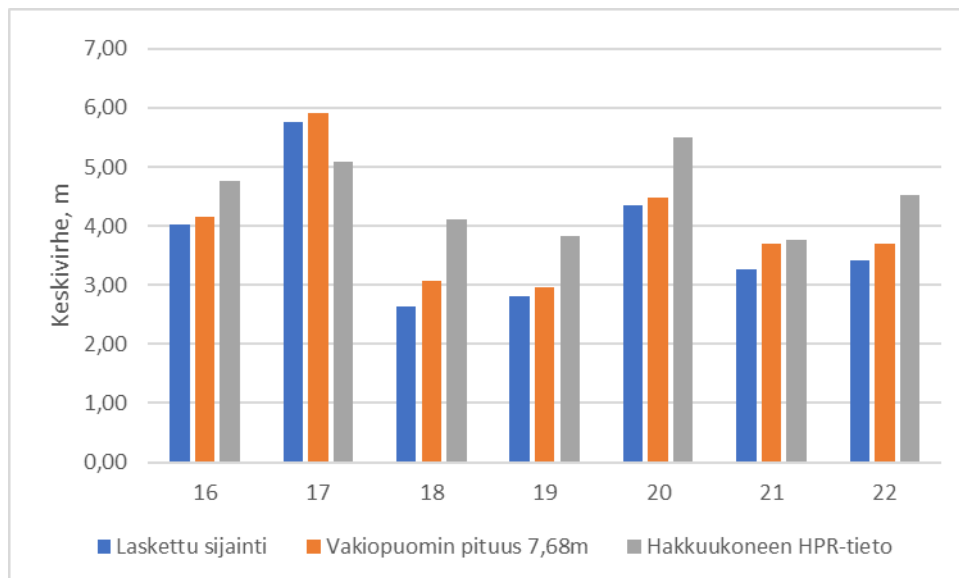


Kuva 8. Päätehakkuu-7 koealakartha.

Koeala	Otanta	Koealakuvaus
16	180	Erillinen leimikonpääty, vaihteleva kuuluvuus
17	72	Metsänreunaa, ojan vieressä
18	107	Tasainen alue keskellä aukkoa
19	113	Keskialuetta
20	301	Metsänreunoja
21	122	Avoimempi ympäröivä metsä, urien loppuja
22	437	Alamäkeen metsänreunassa, katvettä

Taulukko 13. Koealojen otannat ja selitteet.

Koealojen väliset kesquivirheet on esitetty kuviossa 9. Paras paikannustarkkuus oli koealalla-18, jossa kesquivirhe oli lasketulla sijainnilla 2,64 metriä. Huonoin paikannustarkkuus oli koealalla-17, jossa kesquivirhe oli lasketulla sijainnilla 5,75 metriä. Laskentatapa kohtaiset paikannusvirheiden tunnuksia on esitetty taulukossa 14.



Kuvio 9. Kesquivirheet koealoittain eri laskentatapojen välillä.

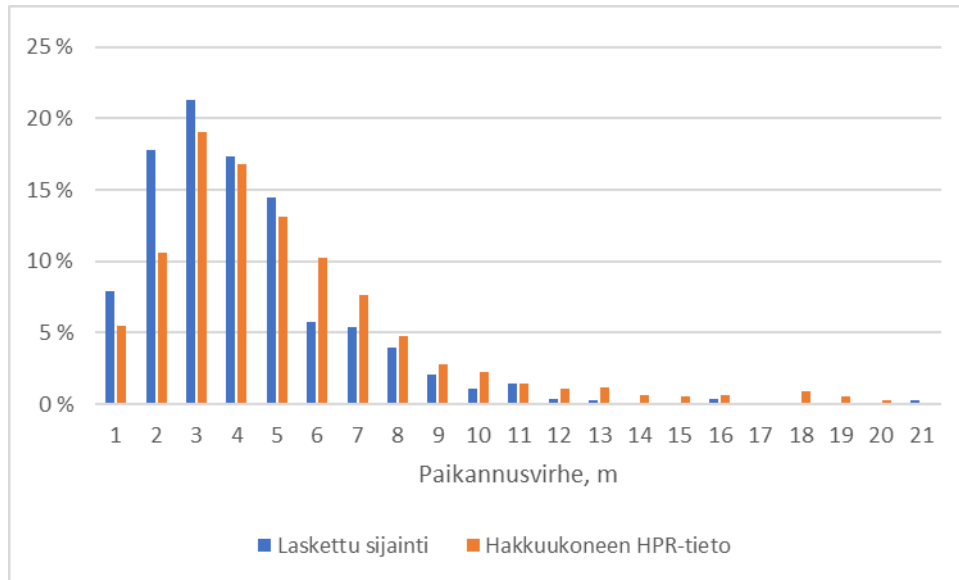
Koeala ja laskentatapa		Keskivirhe, m	Mediaani, m	Keskihajonta, m	Mini-mi, m	Maksi-mi, m	Otan-ta
16	Laskettu sijainti	4,02	3,66	2,24	0,62	11,70	80
	Vakiopuomin pituus 7,68m	4,15	3,77	2,26	1,08	11,70	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	4,77	3,41	4,07	0,55	18,16	
17	Laskettu sijainti	5,75	4,71	4,30	0,45	21,03	44
	Vakiopuomin pituus 7,68m	5,92	5,37	4,25	0,38	20,35	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	5,08	4,93	2,67	0,73	12,38	
18	Laskettu sijainti	2,64	2,52	1,48	0,45	7,08	53
	Vakiopuomin pituus 7,68m	3,07	2,64	1,78	0,07	6,98	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	4,12	3,39	3,47	0,07	18,50	
19	Laskettu sijainti	2,80	2,73	1,42	0,54	6,83	83
	Vakiopuomin pituus 7,68m	2,96	2,89	1,60	0,47	7,87	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	3,84	3,33	2,91	0,15	17,27	
20	Laskettu sijainti	4,34	3,57	3,05	0,17	16,63	218
	Vakiopuomin pituus 7,68m	4,47	3,76	3,13	0,28	16,76	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	5,49	4,24	4,03	0,29	19,47	
21	Laskettu sijainti	3,26	2,77	1,87	0,65	8,36	68
	Vakiopuomin pituus 7,68m	3,70	3,51	2,05	0,47	7,80	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	3,76	3,18	1,96	0,30	8,94	
22	Laskettu sijainti	3,41	2,95	2,17	0,13	12,19	215
	Vakiopuomin pituus 7,68m	3,69	3,37	2,19	0,10	13,02	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	4,53	4,16	2,79	0,12	17,58	

Taulukko 14. Paikannusvirheiden tunnukset koealoittain ja laskentavoittain.

Koealojen keskivirheiden eroja tarkasteltiin t-testin avulla 95 %:n luottamustasolla. Koealojen välillä kaikki yli 50 cm:n suuriset erot olivat tilastollisesti merkitseviä (taulukko 15). Lasketun sijainnin ja hakkuukoneen HPR-tiedon paikannusvirheistä tuotettiin kuvio 10, josta on hyvin havaittavissa sijainnin laskennan vaikutus eri tarkkuusluokkiin.

Koeala	16	17	18	19	20	21	22
16							
17	0,016						
18	< 0,001	< 0,001					
19	< 0,001	< 0,001	0,533				
20	0,326	0,043	< 0,001	< 0,001			
21	0,025	0,001	0,046	0,100	0,001		
22	0,034	0,001	0,003	0,005	< 0,001	0,569	

Taulukko 15. T-testien p-arvot koealojen keskivirheiden erojen tilastollisen merkitsevyyden tarkasteluun. Tilastollisesti merkitsevät arvot kirjoitettu lihavoituina.



Kuvio 10. Päätehakkuu-7 lasketun sijainnin ja hakkuukoneen HPR-tiedon paikannusvirheiden jakauma.

5.2 Paikannustarkkuuteen vaikuttavat tekijät

5.2.1 Maasto-olosuhteet

Maastossa tallennettiin kantojen sijaintitietojen yhteyteen vertailua varten ennalta määritettyjä maasto-olosuhteita, joiden otannat ja selitteet on esitetty taulukossa 16.

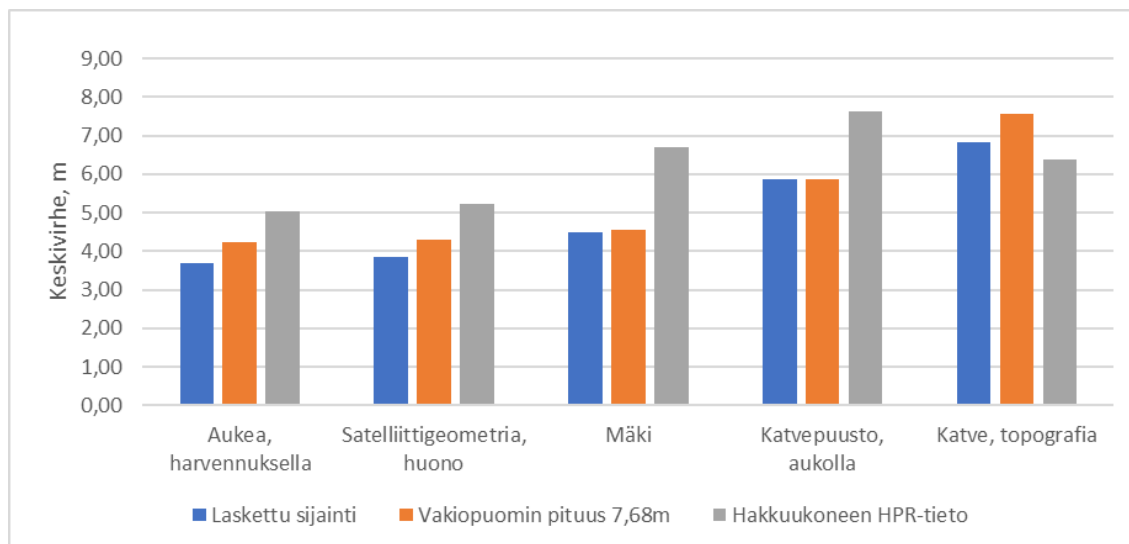
Maasto-olosuhde	Otanta	Selite
Aukea	313	Harvennuksilla varastopaikka, ajourat ja muut aukeat kohdat
Satelliittigeometria, huono	115	Paikantimen tarkkuus heittelee
Mäki	109	Mäen ala- tai keskiosa
Katvepuusto	48	Päätehakuilla metsänreunat ja säästöpuuryhmät
Katve, topografia	11	Maastonmuodoista johtuva katvealue, ainoastaan koealalla 13

Taulukko 16. Maasto-olosuhteiden otannat ja selitteet.

Kantokohtaisia maasto-olosuhteita vertailtaessa lasketulla sijainnilla päästiin tarkimpiin tuloksiin. Keskivirheet lasketulla sijainnilla olivat, aukealla kohdalla

harvennuksella 3,68 metriä, huonolla satelliittigeometrialla 3,86 metriä, mäen- ala- tai keskiosassa 4,50 metriä, puuston aiheuttamassa katveessa aukolla 5,89 metriä ja topografian aiheuttamassa katveessa 6,83 metriä (kuvio 11).

Laskentatapa kohtaiset paikannusvirheiden tunnuksset on esitetty taulukossa 17.



Kuvio 11. Maasto-olosuhteiden keskvirheet laskentatavoittain.

Maasto-olosuhde ja laskentatapa		Keskivirhe, m	Mediaani, m	Keskihajonta, m	Mini-mi, m	Maksi-mi, m	Otan-ta
Aukea	Laskettu sijainti	3,68	3,12	2,75	0,09	20,00	313
	Vakiopuomin pituus 7,68m	4,22	3,61	3,06	0,22	21,81	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	5,03	4,06	3,59	0,12	19,17	
Satelliittigeometria	Laskettu sijainti	3,86	3,09	2,91	0,10	16,63	115
	Vakiopuomin pituus 7,68m	4,31	3,82	2,96	0,53	16,47	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	5,24	4,09	3,99	0,26	19,33	
Mäki	Laskettu sijainti	4,50	3,93	2,80	0,45	16,08	109
	Vakiopuomin pituus 7,68m	4,56	3,98	2,84	0,47	15,39	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	6,71	5,57	4,31	1,11	21,10	
Katvepuusto	Laskettu sijainti	5,89	5,15	3,76	0,62	16,63	48
	Vakiopuomin pituus 7,68m	5,86	5,37	3,73	0,37	16,22	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	7,64	5,72	5,33	0,96	21,10	
Katve, topografia	Laskettu sijainti	6,83	5,94	3,03	2,45	11,59	11
	Vakiopuomin pituus 7,68m	7,55	6,36	3,47	2,69	13,33	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	6,39	6,16	2,54	2,10	10,70	

Taulukko 17. Paikannuslaatuun vaikuttavien tekijöiden paikannusvirheiden tunnuksset eri laskentatavoittain.

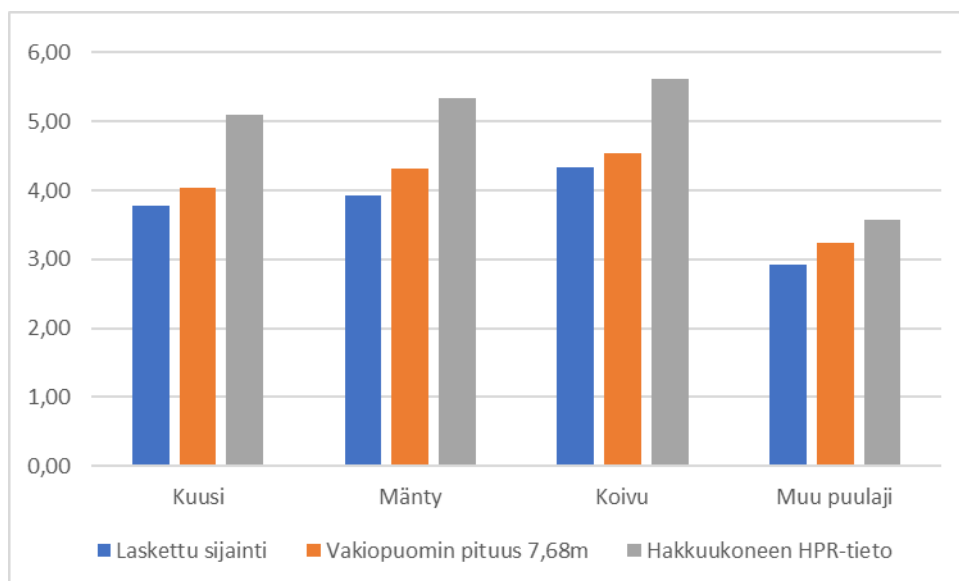
Maasto-olosuhteiden keskvirheiden eroja tarkasteltiin t-testin avulla 95 %:n luottamustasolla (taulukko 18). Maasto-olosuhteiden keskvirheiden erot olivat kaikki tilastollisesti merkitseviä lukuun ottamatta aukean ja satelliittigeometrian eroa sekä topografiasta johtuvan katveen eroa mäen ja katvepuuston kanssa.

Maasto-olosuhde	Aukea	Satelliittigeometria	Mäki	Katvepuusto	Katve, topografia
Aukea					
Satelliittigeometria	0,547				
Mäki	0,007	0,095			
Katvepuusto	< 0,001	0,001	0,016		
Katve, topografia	0,002	0,008	0,729	0,681	

Taulukko 18. T-testien p-arvot maasto-olosuhteiden keskivirheiden erojen tilastollisen merkitsevyyden tarkasteluun. Tilastollisesti merkitsevät arvot kirjoitettu lihavoituina.

5.2.2 Puulajit

Puulaji pystyttiin määrittämään 72,6 %:lla kannoista maastomittauksissa. Tunnistamattomista kannoista suurin osa oli ajourilla, jossa ne olivat kuluneita ja tunnistamattomissa metsäkoneiden yliajon jälkeen. Keskivirheet olivat pienimmät lasketulla sijainnilla. Keskivirheet olivat puulajeittain seuraavat: kuusi 3,78 metriä, mänty 3,93 metriä, koivu 4,33 metriä ja muu puulaji 2,92 metriä (kuvio 12). Puulajien laskentatapakohtaiset paikannusvirheiden tunnuksia on esitetty taulukossa 19.



Kuvio 12. Puulajien keskivirheet eri laskentatapojen välillä.

Puulaji ja laskentatapa		Keskivirhe, m	Mediaani, m	Keskihajonta, m	Minimi, m	Maksimi, m	Otan-ta
Kuusi	Laskettu sijainti	3,78	3,30	2,55	0,07	21,03	1316
	Vakiopuomin pituus 7,68m	4,04	3,55	2,62	0,07	20,35	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	5,09	4,16	3,72	0,07	24,10	
Mänty	Laskettu sijainti	3,93	3,40	2,52	0,10	14,90	422
	Vakiopuomin pituus 7,68m	4,31	3,92	2,72	0,27	19,73	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	5,34	4,20	3,66	0,34	19,17	
Koivu	Laskettu sijainti	4,33	3,80	2,72	0,10	20,00	392
	Vakiopuomin pituus 7,68m	4,54	4,05	2,94	0,22	21,81	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	5,62	4,73	3,84	0,30	20,79	
Muu puulaji	Laskettu sijainti	2,92	2,92	1,47	1,17	6,24	17
	Vakiopuomin pituus 7,68m	3,24	3,62	1,51	0,26	6,11	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	3,58	3,05	1,83	1,11	7,87	

Taulukko 19. Puulajikohtaiset paikannusvirheiden tunnuksat laskentatavoittain.

Puulajien keskivirheiden eroja tarkasteltiin t-testin avulla 95 %:n luottamustasolla. Tulosten perusteella puulajien keskivirheiden eroista kaikki paitsi männyn ja kuusen ero olivat tilastollisesti merkitseviä (taulukko 20).

Puulaji	Kuusi	Mänty	Koivu	Muu puulaji
Kuusi				
Mänty	0,299			
Koivu	< 0,001	0,032		
Muu puulaji	0,029	0,014	0,001	

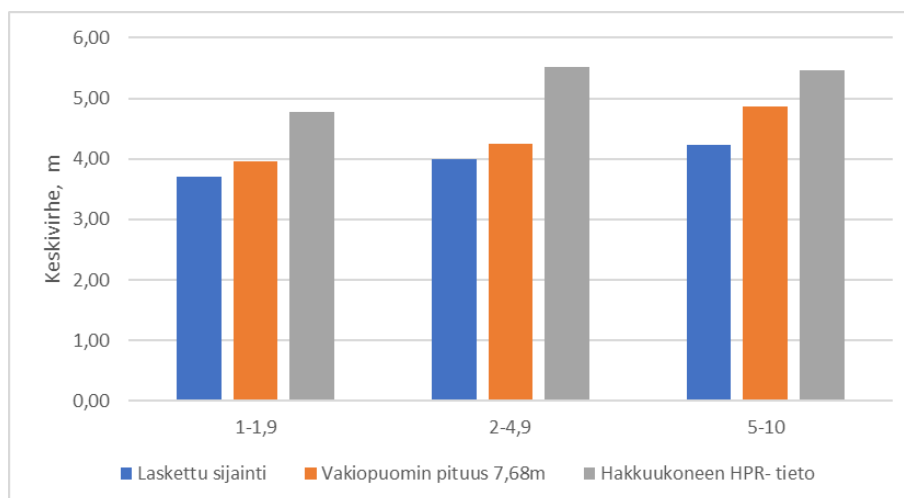
Taulukko 20. T-testien p-arvot puulajien keskivirheiden erojen tilastollisen merkitsevyyden tarkasteluun. Tilastollisesti merkitsevät arvot kirjoitettu lihavoituina.

5.2.3 Paikannuksen laatu

Paikannusvirhettä vertailtiin maastossa kirjattujen paikannusolosuhteiden lisäksi myös tarkkuuspaikantimen PDOP-arvon ja hakkuukoneen paikantimen käyttämien satelliittien määrän perusteella. Lisäksi tarkasteltiin laitteiden välisten paikannuslaatuojen korrelaatiota toisiinsa.

PDOP (Position Dilution of Precision) on arvo, joka kuvaa satelliittien jakauman tasaisuutta taivaalla. Mitä suurempi osa satelliiteista on tasaisesti suoraan yläpuolella ja vähemmän horisontissa, sitä pienempi PDOP-arvo on. Vertailussa käytettyjen PDOP-arvojen laatuluokat ovat erinomainen 1–1,9, hyvä 2–4,9 ja kohtuullinen 5–10. (Marxact 2021.) Huonompi laatuluokitus oli vain neljällä

sijainnilla 2 212 sijainnin otannasta. PDOP-arvojen keskimäärät lasketulla sijainnilla olivat 1–1,9, 3,69 metriä, 2–4,9, 4,00 metriä ja 5–10, 4,17 metriä (kuvio 13). Paikannusvirheet laskentatavoittain on esitetty taulukossa 21.



Kuvio 13. GNSS-tarkkuuspaikantimen PDOP- arvojen keskimäärät eri laskentatavoilla.

PDOP-arvo ja laskentatapa		Keskivirhe, m	Mediaaani, m	Keskihajonta, m	Minimi, m	Maksimi, m	Otanta
1-1,9	Laskettu sijainti	3,69	3,15	2,62	0,10	21,03	914
	Vakiopuomin pituus 7,68m	3,99	3,45	2,73	0,07	21,81	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	4,82	3,86	3,57	0,07	24,10	
2-4,9	Laskettu sijainti	4,00	3,56	2,50	0,07	20,42	1186
	Vakiopuomin pituus 7,68m	4,23	3,87	2,64	0,10	20,32	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	5,45	4,49	3,80	0,12	20,79	
5-10	Laskettu sijainti	4,17	3,79	2,55	0,53	13,80	112
	Vakiopuomin pituus 7,68m	4,63	4,36	2,60	0,50	16,47	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	5,79	5,12	3,63	0,26	18,16	

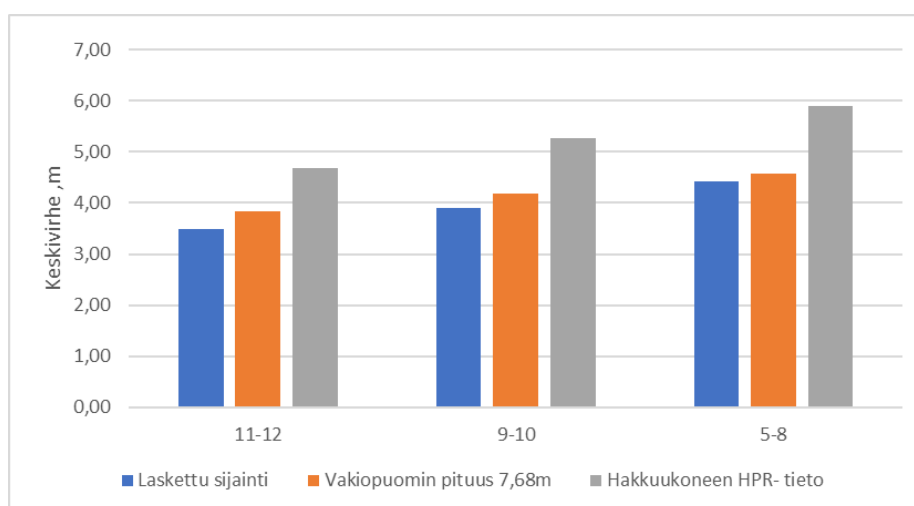
Taulukko 21. PDOP-arvojen paikannusvirheiden tunnuksat laskentatavoittain.

PDOP-arvojen keskimääräisten eroja tarkasteltiin t-testin avulla 95 %:n luottamustasolla. Tulosten perusteella ainoastaan luokkien 1–1,9 ja 2–4,9 keskimääräisten ero oli tilastollisesti merkitsevä (taulukko 22).

PDOP-arvo	1-1,9	2-4,9	5-10
1-1,9			
2-4,9	0,007		
5-10	0,069	0,494	

Taulukko 22. T-testien p-arvot PDOP-arvojen keskimääräisten erojen tilastollisen merkitsevyyden tarkasteluun. Tilastollisesti merkitsevät arvot kirjoitettu lihavoituina.

Hakkuukoneen paikannuksessa käytettyjen satelliittien määrä oli 5–12. Keskivirheet lasketulla sijainnilla olivat: 11–12 satelliitilla, 3,50 metriä, 9–10 satelliitilla, 3,91 metriä ja 5–8 satelliitilla, 4,42 metriä (kuvio 14). Satelliittimäärien väliset paikannusvirheet laskentatavoittain on esitetty taulukossa 23.



Kuvio 14. Hakkuukoneen paikannuksessa käytettyjen satelliittimäärien keskivirheet laskentatavoittain.

Satelliitit ja laskentatapa		Keskivirhe, m	Mediaani, m	Keskihajonta, m	Mini-mi, m	Maksimi, m	Otan-ta
11-12	Laskettu sijainti	3,50	3,09	2,37	0,10	20,00	674
	Vakiopuomin pituus 7,68m	3,84	3,38	2,45	0,07	21,81	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	4,68	3,60	3,72	0,07	19,24	
9-10	Laskettu sijainti	3,91	3,44	2,47	0,07	15,88	1125
	Vakiopuomin pituus 7,68m	4,19	3,76	2,63	0,22	16,76	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	5,28	4,39	3,62	0,12	24,10	
5-8	Laskettu sijainti	4,42	3,89	2,95	0,13	21,03	417
	Vakiopuomin pituus 7,68m	4,57	4,14	3,06	0,10	20,35	
	Hakkuukoneen HPR-tieto	5,89	4,96	3,85	0,26	21,10	

Taulukko 23. Hakkuukoneen käyttämien satelliittimäärien paikannusvirheet laskentatavoittain.

Satelliittimäärien keskivirheiden eroja tarkasteltiin t-testin avulla 95 %:n luottamustasolla. Tulosten perusteella kaikki keskivirheiden erot olivat tilastollisesti merkitsevä (taulukko 24).

Satelliitit	11-12	9-10	5-8
11-12			
9-10	0,001		
5-8	< 0,001	0,002	

Taulukko 24. T-testien p-arvot hakkuukoneen käyttämien satelliittien keskivirheiden erojen tilastollisen merkitsevyyden tarkasteluun. Tilastollisesti merkitsevät arvot kirjoitettu lihavoituina.

Paikannusten laadun välinen korrelaatio on esitetty taulukossa 25.

Tarkkuuspaikantimen PDOP-arvoa verrataan hakkuukoneen paikantimen omaan GPS Precision -luokitukseen sekä satelliittien määrään. Täydellisenä korrelaationa pidetään lukua -1 tai 1. Tarkkuuspaikantimen ja hakkuukoneen välillä ei ole havaittavissa riippuvuutta.

	PDOP	GPSPrecis	Satelliitit
PDOP	1		
GPSPrecis	0,035	1	
Satelliitit	-0,046	-0,860	1

Taulukko 25. Hakkuukoneen paikantimen ja tarkkuuspaikantimen laadun välinen korrelaatio. Tilastollisesti merkitsevät arvot kirjoitettu lihavoituna.

6 Pohdinta

6.1 Tulosten tarkastelu

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää hakkuupään sijaintitiedon tarkkuutta laajemmalla operatiivisella leimikkotason aineistolla kuin aiemmassa Melkkaan ja Riekin (2017) tutkimuksessa. Tarkkuutta selvitettiin vertailemalla GNSS-tarkkuuspaikantimella paikannettuja kantoja hakkuupäälle laskettuihin sijainteihin. Isommassa otannassa mukaan saatiin enemmän vaihtelua eri olosuhteissa ja päästiin vertailemaan merkittävimpiä paikannustarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä toisiinsa. Kaikkiin vertailukohteisiin otettiin mukaan lasketun sijainnin lisäksi myös laskettu sijainti vakioapuomin pituudella sekä hakkuukoneen alkuperäisillä HPR-tiedoilla, joka laajensi vertailuaineistoa huomattavasti.

Tutkimusaineiston kerääminen maastossa oli varsin onnistunut datan laajuuden kannalta. Kantoja saatiin mitattua lähes 3 000 kuukauden aikana kahdelta harvennus- ja kahdelta päätehakkuukohteelta, joihin sisältyi paljon vaihtelua olosuhteissa. Hakkuukohteita oli onneksi muutama ylimääräinen, jonka myötä pystyttiin valitsemaan keräämisen kannalta mielekkäimmät ja kiinnostavimmat kohteet tutkimukseen. Kerätystä aineistosta oli helppo tuottaa vertailu tuloksia ja sen myötä kohteiden määrää pystyttiinkin laajentamaan jonkin verran alkuperäisestä suunnitelmasta, sillä tietoa oli kattavasti käytettävissä yhtä kantoa kohden.

Lasketatapojen vertailussa parhaisiin tuloksiin päästiin suurimmassa osassa tuloksia lasketulla sijainnilla. Toisena oli vakiopuomin pituudella lasketut sijainnit ja viimeisenä hakkuukoneen HPR-tieto. Järjestys oli odotettavissa, koska kantojen sijainnin laskeminen pienentää keskimääräisiä virheitä hakkuukoneen sijainnissa ja kulkusuunnassa. Lisäksi hakkuukoneen HPR-tieto on lähtötieto laskennallisille tarkkuuden parannus menetelmille. Hakkuukoneen HPR-tieto on tulosten perusteella kuitenkin varsin hyvä pohja sijainnin laskennallisille parannuksille. Neljällä vertailukohteella hakkuukoneen HPR-tieto oli myös tarkempi kuin lasketut sijainnit, joten haastavimmissa paikoissa on mahdollista, että laskenta voi myös heikentää tulosta.

Lasketulla sijainnilla päästiin kaikilla kannoilla 3,88 metrin keskivirheeseen, jota käytettiin tulosten tarkastelussa poikkeamien suunnan arviointiin. Korjuulohkojen välillä keskivirheissä ei ollut merkittäviä eroja. Molemmat harvennukset olivat männikkövaltaisia ja päätehakkuut kuusivaltaisia, joista harvennus-1 ja päätehakkuu-7 olivat virheeltään pienimmät, joten hakkuutavan vaikutuksesta ei ollut havaittavissa korrelaatiota paikannustarkkuuteen hakkuukoneessa. T-testin tulosten perusteella paikannustarkkuudeltaan parempien ja huonompien korjuulohkojen erot olivat myös tilastollisesti merkitseviä toistensa kanssa.

Harvennus-1 koealojen tulokset olivat melko tasaiset ja lasketulla sijainnilla päästiin alle neljän metrin keskivirheeseen suurimmalla osalla koealoista. Ainoastaan koeala-3 poikkesi enemmän muista, jossa keskivirhe oli yli yhdeksän metriä. Merkittävä poikkeus keskivirheessä voi johtua väärin yhdistetyistä kannoista. Koeala-3 on varasto- ja aloituspaikka, joten osa

kannoista oli revitty maasta tai muuten kulunut pois varastoa ja metsätien pistoa tehtäessä. Lisäksi hakkuukoneen paikannus voi heitellä kuvion ensimmäisillä puilla, kun hakkuukoneen paikannin hakee vielä tarkempaa sijaintia. Maaston haastavuuden vaikutusta paikannustarkkuuteen ei koealojen välillä ollut havaittavissa harvennuksella-1.

Harvennus-2 koealoista-8, -12 ja -23 jäivät tarkkuudessa yli neljään metriin. Huonommilla koealoilla ei kuitenkaan ollut erityisen poikkeavia maasto-olosuhteita verrattuna muihin koealoihin. Keskivirheen kasvu koealoilla-8 ja -23 johtuu todennäköisesti vaihtelevasta hakkuujärjestyksestä ja koneen liikkumisesta ajourien päissä sekä pienen rinteen kiertämisestä. Koealalla-12 oli heikoin tarkkuus vaikkei sillä ollut mitään erityistä syytä huonolle paikannustarkkuudelle ja maastonkin puolesta se oletettiin melko hyväksi alueeksi. Se on samalla myös suurin koeala, joten tuloksien pitäisi olla varsin luotettavia. T-testin perusteella erot parempiin koealoihin olivat kuitenkin tilastollisesti merkitseviä. Kaikille koealoille saatiin hyvät otannat lukuun ottamatta koealaa-11, joka jäi melko pieneksi tulosten luotettavuuden kannalta. Koealojen eroista kiinnosti maaston perusteella myös koeala-9 ja -10 ero, kun yläpuolella oli avarampaa männikköä ja alapuolella synkempää kuusikkoa, jossa tarkkuus voisi heikentyä. Eroa olikin noin 30 senttimetriä, mutta t-testin perusteella se johtuisi vain otantavirheestä.

Päätehakkuu-5 koealojen tarkkuudet menivät täysin maasto-olosuhteiden mukaan parhaimpana koeala-14 eli tasainen mäenpäällinen, sitten koeala-15 eli mäen alapuolella ja metsän reunassa, jolloin keskivirhe kasvoi noin yhden metrin ja huonoimpana koeala-13, jossa kannot olivat painaumassa ja sen ympärillä olevassa rinteessä. T-testin tulosten perusteella koealojen väliset keskivirheiden erot olivat kaikki tilastollisesti merkitseviä.

Päätehakkuu-7 koealoista yli puolet oli noin 20 metriä korkean kuusikon reunassa. Avoimilla paikoilla olivat koealat-18, -19 ja -21, jotka olivat myös tarkkuudeltaan parhaimmat. Metsänreunassa olevilla koealoilla päästiin kuitenkin myös noin neljän metrin luokkaan. Ainoastaan koeala-17 poikkesi keskiarvosta, johon osasyllisenä on todennäköisesti alueen vieressä kulkeva oja, joka on muuttanut hakkuujärjestyttä. Koealan tuloksissa poikkeavaa on myös se, että sijainnin tarkkuus on ollut paras HPR-tiedoissa ja laskennalliset

menetelmät ovat vain heikentäneet sitä. Todennäköisesti hakkuukoneen suunta on heitellyt ojaa kierrettäessä ja tämän myötä kantojen paikkoja on laskennassa muutettu väärään suuntaa.

Paikannustarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä saatiin kerättyä maastossa tarkkuuspaikantimeen tavoitteiden mukaisesti. Ainoastaan topografiasta johtuvat katveet ja muu puulaji jäivät otannoiltaan liian pieneksi t-testien ja tulosten luotettavuuden kannalta. Varsinkin topografiasta johtuvia katvepaikkoja olisi ollut mielenkiintoista päästä mittaamaan useasta paikasta, koska jokainen paikka on aina erilainen ja harvennuksella mukaan saataisiin vielä pystyyn jäävän puuston aiheuttama katve. Muu puulaji kattoi tunnetuimpia Suomen talousmetsissä kasvavia lehtipuita eli pääasiassa haapaa ja leppää, joten isommassa otannassa niiden tulokset olisivat olleet todennäköisesti lähempänä koivua kuin nyt.

Maasto-olosuhteiden väliltä löytyi selkeää korrelaatiota paikannustarkkuuden muutoksiin. Aukeilla olevilla kannoilla päästiin alle keskiarvon paremman näkyvyyden ansiosta. Satelliittigeometrialla ei ollut vaikutusta kumpaankaan suuntaan, joten hakkuukoneella ei luultavasti ollut samalla paikkaa ongelmia paikannuksessa kuin tarkkuuspaikantimella. Tämä johtuu siitä, että satelliittigeometria ja satelliittien lukumäärä oli todennäköisesti erilainen hakattaessa puustoa ja kerättäessä referenssiaineistoa. Lisäksi hakkuukoneen paikannin on korkeammalla hakkuukoneen katolla suhteessa referenssimittauksiin, jotka tehtiin kartoitussauvalla. Paikannustarkkuutta ja sitä kuvaavia tunnuksia testattiin korrelaatiotestillä, ja myös tämä puoltaa eroavaisuutta paikantimien välillä.

Loput maasto-olosuhteista heikensivät tarkkuutta haastavuutensa mukaisesti. Mäki ei aiheuttanut vielä merkittävästi ongelmia, mutta katve alueilla keskivirheet kasvoivat merkittävästi. T-testin perusteella topografiasta johtuvan katveen keskivirheen erot voisivat johtua mäen ja katvepuuston kanssa pelkästä otantavirheestä.

Puulajeissa ei ollut isoja eroja paikannustarkkuudessa. Ainoastaan muu puulaji poikkeisi muita paremmalla tarkkuudellaan, mutta sen otanta jäi myös melko pieneksi. Havupuista kuusella päästiin vähän parempaan tarkkuuteen kuin

männyllä, vaikka männyn latvuston pitäisi aiheuttaa vähemmän katvetta kuin kuusen. Osa-syyllisenä kuusen parempaan tarkkuuteen voi kuitenkin olla se, että päätehakkuut olivat kuusikkovaltaisia. Koivu on puulajeista eniten katvetta aiheuttava varsinkin tutkimuksessa käytetyissä kesähakkuu kohteissa, jolloin puissa on vielä lehdet. Koivu oli tarkkuudeltaan huonompi kuin havupuut, joka puoltaisi latvuston peitteisyyden vaikutusta. T-testin perusteella kaikkien puulajien paitsi männyn ja kuusen väliset erot olivat tilastollisesti merkityksellisiä.

Paikannuksen laadun vaikutuksia tutkiessa tarkkuuspaikantimen PDOP-arvon kasvaessa myös keskivirhe kasvoi. PDOP- arvoista suurin osa oli luokassa erinomainen tai hyvä, joten paikannuksen laatu pysyi pääasiassa koko ajan hyvänä. PDOP-arvon vaikutus kantojen keskivirheeseen oli noin 50 senttimetriä. T-testin perusteella kohtuullinen-laatuluokassa, erot voivat kuitenkin johtua vain otantavirheestä.

Hakkuukoneen käyttämien satelliittien määriä vertailtaessa keskivirheiden erot olivat lähes yhden metrin luokkaa, ja niillä onkin suora vaikutus hakkuutilanteen paikannustarkkuuteen. Satelliittimäärien väliset paikannuserot olivat kaikki t-testin perusteella tilastollisesti merkitseviä.

Aikaisemmin hakkuupään sijaintitiedon tarkkuutta on selvitetty Melkkaan ja Riekin (2017) tutkimuksessa, jossa päästiin samoilla menetelmillä, mutta pienemmällä noin 630 kannon otannalla noin 4,9 metrin keskivirheeseen. Edellisen tutkimuksen tulosta heikensi kuitenkin mahdollisesti se, että hakkuukoneella hakattiin varta vasten kahdeksan koealaa mittauksia varten, joten noin sataa kantoa kohden tuli aina yksi työmaan aloitus, jolloin hakkuukone saattoi vielä hakea tarkempaa sijaintiaan.

Tutkimuksen tulokset paranivat siis otannan kasvaessa noin yhdellä metrillä aiempaan tutkimukseen verrattuna, vaikka menetelmät olivat lähes samat. Tulos oli varsin hyvä myös siihen nähden, että hakkuukoneen paikannuksen tarkkuudessakaan ei ole päästy kaikissa tutkimuksissa alle neljään metriin puhumattakaan hakkuupäänpaikan laskennan omasta virheestä.

vertaamalla hakkuukoneen GPS-paikantimen sijaintitietoa, VRS-korjausta käyttävään GNSS-tarkkuuspaikantimella kerättyyn dataan

Hakkuukoneen paikannusjärjestelmän tarkkuudesta on saatu vaihtelevia tutkimustuloksia, ja otannat niissä ovat olleet melko pieniä. Melkkaan, Salmen ja Hämmäläisen tutkimuksessa (2014) hakkuukoneen paikannustarkkuutta selvitettiin vertaamalla hakkuukoneen GPS-paikantimen ja VRS-korjausta käyttävän GNSS-tarkkuuspaikantimen sijaintitietoja toisiinsa. Tutkimuksessa päästiin 16 koealan kokoisella alueella keskimäärin 2,07 metriin ja toisella 15 koealan alueella 3,91 metriin. Tutkimuksessa käytetyt koealat olivat säteeltään noin 10 metriä.

Hakkuukoneen paikannustarkkuutta on myös testattu mönkijän avulla Kaartinen ym. tutkimuksessa (2015). Hakkuukonetta simuloivaan mönkijään oli asennettu useampaa satelliittijärjestelmää hyödyntävä GNSS-paikannin, jolla tallennettiin sijaintia ajourilla liikkumisen aikana. Sijainteja verrattiin ajoreitin varrella olleisiin puihin, joiden sijainnit mitattiin takymetrillä ja reaaliaikaisella kinemaattisella GPS:llä. Tutkimuksessa paikannustarkkuus vaihteli keskimäärin 4,2 ja 9,3 metrin välillä.

6.2 Luotettavuus ja virhearviointi

Tutkimusta varten saatiin kerättyä aineistoa jokaiselta kohteelta hyvin, jonka vuoksi varsinkin isommat kokonaisuudet vertailussa ovat tuloksiltaan varsin luotettavia. Yksittäisiä kohteita toki jäi otannaltaan turhan pieneksi, joka heikentää vertailu kelpoisuutta. Riittävänä otoskokona pidettiin 30 kantoa, joka on suositeltu minimi esimerkiksi t-testissä tulosten luotettavuuden kannalta. Se on varmasti hyvä minimi määrä myös muiden tulosten luotettavuuden tarkasteluun, koska pienemmissä määrissä otantavirheen todennäköisyys kasvaa huomattavasti.

Aineiston keruussa suurin ongelma oli se, että tietoa ei päästy keräämään alle vuoden sisällä hakatuilta leimikoilta. Tutkimuksessa käytetyt kohteet oli hakattu vuonna 2016, joten varsinkin päätehakkuukohteet olivat paikoitellen vesakoituneita tai kannot olivat muutenkin ehtineet hukkumaan maastoon.

Päätehakkuilla kannot olivat onneksi isompia, joten ne löytyivät helpommin aluskasvillisuuden seasta, mutta niiden välissä olevista pienemmistä kannoista osa jäi varmasti huomaamatta. Koealoilla olleista kannoista löydettiin kuitenkin noin 80 %, joka oli tässä kohtaa todella hyvä osuus ottaen huomioon viiden vuoden muutoksen kohteilla.

Olisikin mielenkiintoista tietää kuinka paljon yhdistettyjen kantojen osuus olisi kasvanut, jos kannoista olisi löydetty esimerkiksi 90 %, jolloin olisi ollut vähemmän mittaamattomia kantoja, jotka sekoittavat yhdistämistä. Mitä enemmän kannoille olisi löydetty vastinpareja sitä pienempi väärin yhdistämisen mahdollisuus olisi ollut. Lisäksi suuremmasta osasta olisi tunnistettu paremmin läpimitta ja puulaji, joka olisi myös helpottanut yhdistämistä.

Yhdistämisvirheitä tutkimuksessa tuli melko varmasti, mutta suurin kysymys onkin, että kuinka paljon ja vaikuttivatko ne keskivirheeseen positiivisesti vai negatiivisesti. Esimerkiksi koeala-3 poikkesi suuresti kaikista muista tuloksista, jossa väärin yhdistetyt kannot voisivat olla hyvin syynä virheen kasvulle. Toisaalta hakkuukoneen tarkkuutta saattoi taas parantaa se, ettei kaikkia kantoja pystytty yhdistämään, jolloin virheellisesti on voitu jollain kannolla yhdistää se vain lähimpään kantaan eikä oikeaan vastinpariin. Tällaisten kantojen osuus on toki erittäin pieni, koska valtaosalla kannoista tiedettiin puulaji ja läpimitta, jotka helpottivat yhdistämistä huomattavasti.

Tulosten luotettavuutta tarkasteltaessa on myös hyvä ottaa huomioon, ettei tarkkuuspaikantimenkaan sijainti välttämättä ole aina se oikea vaan siinäkin on oma paikannusvirheensä. Nykyisillä GNSS-tarkkuuspaikantimilla virheet ovat onneksi melko pieniä, mutta varsinkin katvepuusto voi aiheuttaa aina virhettä vaikeammassa paikoissa.

6.3 Jatkotutkimus- ja kehitysideat

Hakkuupään sijaintitieto vaatii vielä paljon kehitystä, ennen kuin sitä voidaan hyödyntää tarkempaan metsävaratietojen päivittämiseen. Hakkuupään sijaintitietoa voidaan hyödyntää esimerkiksi puukarttojen luomisessa, hakkuukuvioiden ja ajourien muodostamisessa, puukasojen sijaintitietona sekä

leimikon ja suojavyöhykkeiden rajoilta poistettavissa puissa. Näissä kaikissa pitäisi hakkuupään sijainnin tarkkuus olla vähintään yhden metrin luokkaa, mutta joissain tilanteissa sekään ei vielä riitä. Esimerkiksi rajapuita hakattaessa ei voida mennä yhtään naapurin puolelle. Lisäksi hakkuupään sijainnin tarkentaminen laskennallisesti pitäisi saada automaattiseksi ja reaaliaikaiseksi, jotta hakkuupään tarkin paikkatieto olisi käytössä myös työskentelyn aikana.

Seuraavana tutkimuksena, aiheeseen liittyen kiinnostaisikin tietää uusimpien hakkuukoneiden paikannustarkkuutta erilaisissa olosuhteissa, kun järjestelmät kehittyvät eteenpäin ja satelliittijärjestelmiä on enemmän käytävissä. Kun päästään hakkuukoneen tarkkuuksissa esimerkiksi alle metrin luokkaan niin saadaan parannusta huomattavasti myös hakkuupään sijainnin tarkkuuteen. Hakkuukoneiden kärkiohjauksen yleistyessä voidaan myös saada parannusta puomin pituuden mittaamiseen ja sen myötä hakkuupään paikan laskentaan, kun jatkovarsi anturoidaan ja muu tekniikka kehittyy.

Hakkuukoneeseen olisi mielenkiintoista kokeilla myös paikantimen asennusta hakkuupäähän laskennan tueksi. Yksistään sillä ei todennäköisesti päästäisi samanlaisiin tarkkuuksiin, kuin esimerkiksi ASTA-GPS-järjestelmillä, joista perusjärjestelmälle luvataan noin yhden metrin tarkkuutta ja ASTA-ex-järjestelmälle senttimetrien tarkkuuksia (Risutec 2021). ASTA:n tarkkuusluvut perustuvat kuitenkin pääasiassa avoimilla paikoilla työskentelyyn, jolloin näkyvyys taivaalle on parempi ja satelliitteja on enemmän käytössä. Hakkuukoneella samankaltainen paikannustapa voisi jopa heikentää nykyistä laskentatapaa, kun hakkuupää olisi puunpaikannushetkellä aina puun tyvellä, jossa näkyvyys on huonoin.

Hakkuupään sijaintitieto tulee olemaan isossa roolissa hakkuukonetiedon hyödyntämisessä tulevaisuudessa, minkä takia tutkimuksen aihe oli erittäin kiinnostava ja ajankohtainen. Hakkuukoneen paikannusteknologia vaatii vielä paljon päivittämistä, ennen kuin sillä päästään vaadittuihin tarkkuuksiin. Hakkuukoneen työympäristö on kuitenkin niin haastava, että vaadittavan paikannusteknologian kustannukset voivat nousta vielä nykyisellään liian suureksi. Toinen ongelma on, ettei haastavimmissa paikoissa välttämättä päästä tiettyä parempiin tarkkuuksiin, kun samaan yhtälöön laitetaan hyvä näkyvyys taivaalle ja metsässä työskentely.

Lähteet

- ASTA-GPS-tiedonkeruu ja raportointi alustakoneeseen. 2021.
<https://www.risutec.fi/fi/asta-gps-tiedonkeruu-ja-raportointi-alustakoneeseen/>. 20.11.2021.
- European GNSS Service Centre. 2021. <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellation-information>. 4.8.2021.
- Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing, Korolyov, Russia. 2021. <https://www.glonass-iac.ru/en/index.php>. 4.8.2021.
- Hannrup, B., Bhuiyan, N. & Möller, J. 2011. Utvärdering av ett system för beräkning och återföring av skördarbaserad information till skogliga register och planeringssystem. Arbetsrapport 757/2011. Skogforsk. https://www.skogforsk.se/cd_20190114161735/contentassets/9de73b24a11f401ab094fbdcf09124ab/arbetsrapport-757-2011.pdf. 9.8.2021.
- Hannrup, B., Möller, J. & Bhuiyan, N. 2016. Automatiserad gallringsuppföljning – Användargrupp för hprGallring. Arbetsrapport 901/2016. Skogforsk. 40 s.
<https://www.skogforsk.se/contentassets/110122875a374a55a924eb87e73fb9b3/automatiserad-gallringsuppfoljning-anvandargrupp-for-hprgallring-arbetsrapport-901-2016.pdf>. 12.10.2021.
- Kaartinen, H., Hyypä, J., Vastaranta, M., Kukko, A., Jaakkola, A., Yu, X., Pyörälä, J., Liang, X., Liu, J., Wang, Y., Kaijaluoto, R., Melkas, T., Holopainen, M. & Hyypä, H. 2015. Accuracy of Kinematic Positioning Using Global Satellite Navigation Systems under Forest Canopies.
https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/159321/forests_06_03218.pdf?sequence=1&isAllowed=y. 7.12.2021
- Laasasenaho, J. 1982. Taper Curve and Volume Functions for Pine, Spruce and Birch. Doctoral dissertation. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae. University of Helsinki. Helsinki, Finland. 6.10.2021.
- Laitinen, O. & Hämäläinen, J. 2021. Puuhuolto siirtyy digiaikaan. Metsä Group. <https://www.metsagroup.com/fi/Campaigns/AlykasMetsa/alykasmetsa/Puuhuolto-siirtyy-digiaikaan/Pages/default.aspx>. 24.11.2021.
- Maanmittauslaitos. 2021. Satelliittipaikannus.
<https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/teematietoa/satelliittipaikannus>. 4.8.2021.
- Marxact. 2021. What is DOP, PDOP, HDOP, VDOP and where can I find this information? <https://support.marxact.com/article/111-what-is-dop-pdop-hdop-vdop-and-where-can-i-find-this-information>. 28.10.2021.
- Melkas, T. 2018. Mittaus ja laatu -opas. Metsäteho. <https://puuhuolto.fi/mittaus-ja-laatu/mittaus-maastossa/hakkuukonemittaus/mittausmenetelma/>. 31.8.2021.
- Melkas, T. 2021. Metsätehon tiedote 10/2021.
<https://www.metsateho.fi/mittaustilasto-julkaistu-hakkuukonemittauksen-osuus-kasvanut-hankintahakkuissa/>. 20.8.2021.
- Melkas, T. & Rieki, K. 2017. Puiden paikannustarkkuus hakkuukoneen tallennettuun sijaintiin ja kouran anturointiin perustuen – laskennallinen algoritmi kouran sijainnin tarkentamiseksi. Metsätehon tuloskalvosarja 9/2017.

- https://www.metsateho.fi/wpcontent/uploads/Tuloskalvosarja_2017_09_Puiden_paikannustarkkuus_hakkuukoneen_tallennettuun_sijaintiin.pdf. 9.12.2021.
- Melkas, T., Riekk, K. & Sorsa, J.-A. 2020. Automated Method for Delineating Harvested Stands Based on Harvester Location Data. MDPI. <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/17/2754/htm>. 15.9.2021.
- Melkas, T., Salmi, M. & Hämäläinen, J. 2014. Satelliittipaikannuksen tarkkuus hakkuukoneessa. Metsätehon raportti 231. <https://docplayer.fi/10297310-Satelliittipaikannuksen-tarkkuus-hakkuukoneessa.html>. 20.11.2021.
- Melkas, T. & Visala A. 2009. Hakkuukoneella kerätyn mittaustiedon hyödyntäminen. Metsätieteenaikakauskirja 4/2009. <https://www.metsatieteenaikakauskirja.fi/pdf/article6340.pdf>. 12.8.2021.
- Metsäkeskus 2021. Tiedon ajantasaistus. <https://www.metsakeskus.fi/fi/avoin-metsa-ja-luontotieto/tietojen-yllapito/tiedon-ajantasaistus>. 16.9.2021
- Metsäkeskus 2021. Tiedon laatu. <https://www.metsakeskus.fi/fi/avoin-metsa-ja-luontotieto/tietojen-yllapito/tiedon-laatu>. 16.10.2021
- Ovaskainen, H. 2012. Koneellinen puunkorjuu. Metsätehon opas. <https://puuhuolto.fi/koneellinen-puunkorjuu/koneellinen-puutavaran-valmistus/>. 10.11.2021.
- Ovaskainen, H. 2019. Kohti automaattista puunkorjuun laadun mittaamista. Metsätehon raportti 251. https://metsateho.fi/wp-content/uploads/Raportti_251_Kohti_automattista_puunkorjuun_laadun_mittaamista.pdf. 19.10.2021.
- Peltoniemi, N., Eronen, J., Palander, T., Ovaskainen, H. & Kärhä, K. 2019. Puustovaurioiden määrittäminen ajouralle näkyvien vaurioiden perusteella. Metsätehon tuloskalvosarja 3/2019. https://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tuloskalvosarja_2019_03_Puustovaurioiden_maarittaminen.pdf. 20.9.2021.
- Poutanen, M. 2016. Satelliittipaikannus. Tähtitieteellinen yhdistys Ursa ry. Tallinna 2016. 12.8.2021.
- Riekk, K., Melkas, T., Ovaskainen, H., Poikela, A & Sorsa, J.-A. 2019. Metsätehon tuloskalvosarja 4/2019. https://metsateho.fi/wp-content/uploads/Tuloskalvosarja_2019_04_Ajourien_automattinen_tuottaminen.pdf. 20.11.2021.
- Räsänen, T., Melkas, T. Riekk, K. Sorsa, J.-A. Poikela, A, & Hämäläinen, J. 2019. Hakkuukoneet metsätiedon tuottajina. Metsätieteen aikakauskirja vuosikerta 2019 artikkeli id 10250. <https://metsatieteenaikakauskirja.fi/article/10250>. 13.11.2021.
- Saukkola, A., Melkas, T., Riekk, K., Sirparanta, S., Peuhkurinen, J., Hyyppä, J. & Vastaranta, M. 2019. Predicting Forest Inventory Attributes Using Airborne Laser Scanning. Aerial Imagery, and Harvester Data. Remote Sensing. https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/303120/remotesensing_11_00797.pdf?sequence=1&isAllowed=y. 10.8.2021.
- Seppälä, P., Malinen, J., Riekk, K., Ovaskainen, H., Strandström, M., Räsänen, T., Poikela, A. & Sorsa, J.-A. 2021. Metsätiedon palvelualusta puunkorjuun laadunhallinnassa ja talousmetsän luonnonhoidon todentamisessa. Metsätehon raportti 262. <https://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Raportti-262-Metsätiedon-palvelualusta-puunkorjuun-laadunhallinnassa.pdf>. 17.11.2021.

- Skogforsk. 2021. StanForD/StanForD 2010-Standard for Forest Machine Data and Communication. Skogforsk, Sweden 2021. Saatavissa: <https://www.skogforsk.se/english/projects/stanford/>. 12.9.2021.
- Strandström, M. 2019. Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2018. Metsätehon tuloskalvosarja 17a/2019. https://metsateho.fi/wp-content/uploads/Tuloskalvosarja_2019_17a_Puunkorjuu_ja_kaukokuljetus_vuonna_2018.pdf. 12.9.2021.
- Uusitalo, J. 2012. Metsäteknologian perusteet. Hämeenlinna: Metsälehti Kustannus ja tekijä. 28.10.2021.
- Vihavainen, T. 2020. Satelliittipaikannuksen nykytila ja kehitysnäkymät. Traficom. <https://www.traficom.fi/fi/satelliittipaikannuksen-nykytila-ja-kehitysnakymat>. 12.10.2021.