



■ Seppo Rouvinen



■ Jari Varjo



■ Kari T. Korhonen

Seppo Rouvinen, Jari Varjo ja Kari T. Korhonen

GPS-paikannuksen tarkkuus metsässä

Rouvinen, S., Varjo, J. & Korhonen, K.T. 1999. GPS-paikannuksen tarkkuus metsässä. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/1999: 51–63.

GPS (Global Positioning System) -paikannuksen tarkkuutta testattiin kahdessa eri aineistossa ja kahdella eri laitteistolla. Kiteen aineistossa, joka käsitti 63 koealaa, käytettiin kahdeksankanaavaista vastaanotinta ja suuremmassa, VMI-aineistossa oli käytössä yksikanavainen vastaanotin.

Tulokset osoittavat, että käytettäessä differentiaalikorjausta päästään metsäoloissa tarkkoihin tuloksiin. Erot karttamittauksiin ovat muutaman metrin luokkaa 8-kanavaisella vastaanottimella, mutta huomattavasti suuremmat 1-kanavaisella vastaanottimella. Korjaussignaalia ja 8-kanavaista vastaanotinta käytettäessä saadaan sijaintitietoa, joka on riittävän tarkkaa esimerkiksi satelliittikuvatulkinnassa käytettäväksi. Tutkimuksen aineistoissa metsikön puulaji, puuston pituus, pohjapinta-ala tai muut puustotunnukset eivät vaikuttaneet paikannuksen tarkkuuteen merkittävästi. Ongelmia satelliittipaikannuksessa voi sen sijaan aiheuttaa se, ettei GPS-vastaanotin saa signaalia riittävän monesta satelliitista kaikkialla metsässä.

Asiasanat: GPS, VMI, differentiaalikorjaus, satelliittipaikannus, metsikkökoeala

Yhteystiedot: *Rouvinen*, Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta, PL 111, 80101 Joensuu; *Varjo* ja *Korhonen*, Metsäntutkimuslaitos, Helsingin tutkimuskeskus, Unioninkatu 40 A, 00170 Helsinki. Puh. (013) 251 4402, sähköposti seppo.rouvinen@forest.joensuu.fi

Hyväksytty 26.1.1999

1 Johdanto

Metsistä kerättävän tiedon käyttökelpoisuuden edellytyksenä on usein tiedon paikkasidonaisuus. Esimerkiksi kaukokartoitus- ja maastotietojen yhdistämiseen perustuvissa inventoinneissa maastotietojen tarkka paikantaminen on kuvatulkinnan onnistumisen edellytys. Paikkaansidottua tietoa voidaan hankkia monella eri tavalla, esimerkiksi kaukokuvatulkintana, maastotyönä tai muiden tietojärjestelmien tiedoista. Kun halutaan tarkkaa ja ajantasaista tietoa, joudutaan usein turvautumaan maastomittauksiin. Tällöin sijainnin tarkka selvittäminen on hankalaa ja aikaavievää. Paikan (esimerkiksi koealan) sijainti voidaan määrittellä karttaa, kompassia ja mittanauhaa käyttäen. Kompassi ja mittanauha voidaan korvata takymetrillä tai jollakin muulla tarkkuusmittauskojeella. Tarkka mittaminen perinteisillä menetelmillä on kuitenkin niin kallista, että sitä voidaan käyttää vain erityistapauksissa.

Halutun pisteen koordinaatit voidaan määrittää automaattisesti nykyisin myös satelliittipaikannuksella (GPS). Yhdysvaltain puolustushallinnon 24 GPS-satelliittia kiertävät maapalloa ja lähettävät navigointisignaalia, jonka perusteella maassa oleva GPS-vastaanotin laskee oman sijaintinsa. Kaksiulotteinen paikantaminen edellyttää samanaikaisesti signaalia vähintään kolmesta satelliitista ja kolmiulotteinen paikannus vähintään neljästä satelliitista. Suomessa nämä ehdot täytyvät lähes jatkuvasti ainakin avoimessa maastossa. Siksi GPS-paikannus tarjoaa kiinnostavan mahdollisuuden tarkasti paikkaansidotun metsätiedon tuottamiseen. Käytettävyyden edellytyksenä kuitenkin on, että paikannus on myös metsäoloissa riittävän tarkkaa ja että mittauslaitteiston hankinta- ja käyttökustannukset eivät ylitä paikannuksella saatavaa lisähyötystä.

GPS-paikannuksen tarkkuuteen vaikuttavat monet tekijät. Siviilikäyttöön tarkoitettua signaalia häiritään tahallisesti (S/A). Muita epätarkkuutta aiheuttavia tekijöitä ovat satelliittien kello- ja ratavirheet sekä vastaanottimen virheet. Lisäksi ilmakehän muuttuvat ominaisuudet ja satelliittien keskinäinen sijainti taivaankannella (satelliittigeometria) vaikuttavat mittaus tarkkuuteen. Satelliittien signaalit eivät läpäise kiinteitä esteitä (puut, rakennukset jne.) vaan heijastuvat niistä. Tätä signaalin moni-

tieheijastusta (*multipath effect*) pidetään suurena, ellei suurimpana virhettä aiheuttavana tekijänä (Leick 1995). Tällä hetkellä ei ole olemassa menetelmää oikean signaalin erottamiseksi heijastuneesta. Pahimmassa tapauksessa kiinteät esteet estävät kokonaan signaalin tulon GPS-vastaanottimeen. Korjaamaton sijaintitieto on epätarkkaa: mittaus tulos on 95 %:n todennäköisyydellä alle 100 m:n päässä oikeasta tuloksesta (Leick 1995). Paikannusta voidaan tarkentaa ns. differentiaalikorjauksella. Tällöin GPS-vastaanottimen antamaa sijaintitietoa korjataan jossakin koordinaateiltaan tarkasti tunnetussa paikassa olevan kiinteän vastaanottimen avulla. Differentiaalikorjatun sijaintitiedon virheen oletetaan olevan korkeintaan muutaman metrin luokkaa riippuen laitteistosta ja olosuhteista.

Satelliittipaikannustekniikan kehittyminen on avaamassa monipuolisia mahdollisuuksia metsällisiin sovelluksiin. USA:n metsähallinto (USDA Forest Service) on listannut jo vuonna 1992 yli 130 mahdollista GPS:n metsäsovellusta (Kruczynski ja Jasumback 1993). Nykyisin GPS-tekniikkaa käytetään Suomessa laajemmassa mitassa puutavaran kuljetuksen ohjauksessa sekä metsäkoneiden karttajärjestelmien osana. Metsätalouden muissa sovelluksissa GPS:n käyttö on vielä vähäistä. Suomen valtakunnan metsien 8. inventoinnissa GPS-laitteita on käytetty Pohjois-Suomessa suunnistuksen apuvälineenä sekä testattu koealojen paikannuksessa 9. inventoinnin alussa vuonna 1996. Metsävaratietojen ajantasaistuksen ja hakkuun suunnittelussa tai toteutuksessa GPS-paikannus saattaa tarjota uusia mahdollisuuksia (vrt. Holopainen ym. 1996, Hyppänen ym. 1996, Räsänen ym. 1997, Varjo 1997).

GPS:n käyttöä kuviorajojen määrittämisessä ja pinta-alojen laskennassa ovat tutkineet mm. Bergström ja Olsson (1993), Hellström ja Johansson (1993a,b), Johansson (1993), Hämäläinen ja Räsänen (1994), Liu ja Brantigan (1995), Hyppänen ym. (1996), Jasumback ja Chamberlain (1996) ja Härkönen ja Kumpare (1997). Erilaisissa metsissä GPS-signaalin saantia ovat tutkineet mm. Hämäläinen ja Räsänen (1994) ja D'Eon (1995). Hellström ja Johansson (1993a) ovat verranneet pisteen mittaus tarkkuutta avoimella istutusalueella ja hakkuukypsässä metsässä. GPS-paikannusta metsäautotieverkon päivittämisessä ovat tutkineet Johansson ja Gunnarsson (1994). Erilaisten mittauslaitteistojen

toimintaa ja tarkkuutta metsäolosuhteissa ovat tutkineet mm. Jasumback (1996) ja Courteau ja Darche (1997). Metsäkoneissa GPS:n soveltamista on tutkinut mm. Thor ym. (1996).

Tässä työssä selvitetään GPS-laitteiden paikannustarkkuutta puustoisissa kohteissa metsän inventoinnin sovelluksia silmällä pitäen. Käytettävät laitteet ovat Trimble Pro XR ja Garmin GPS 45.

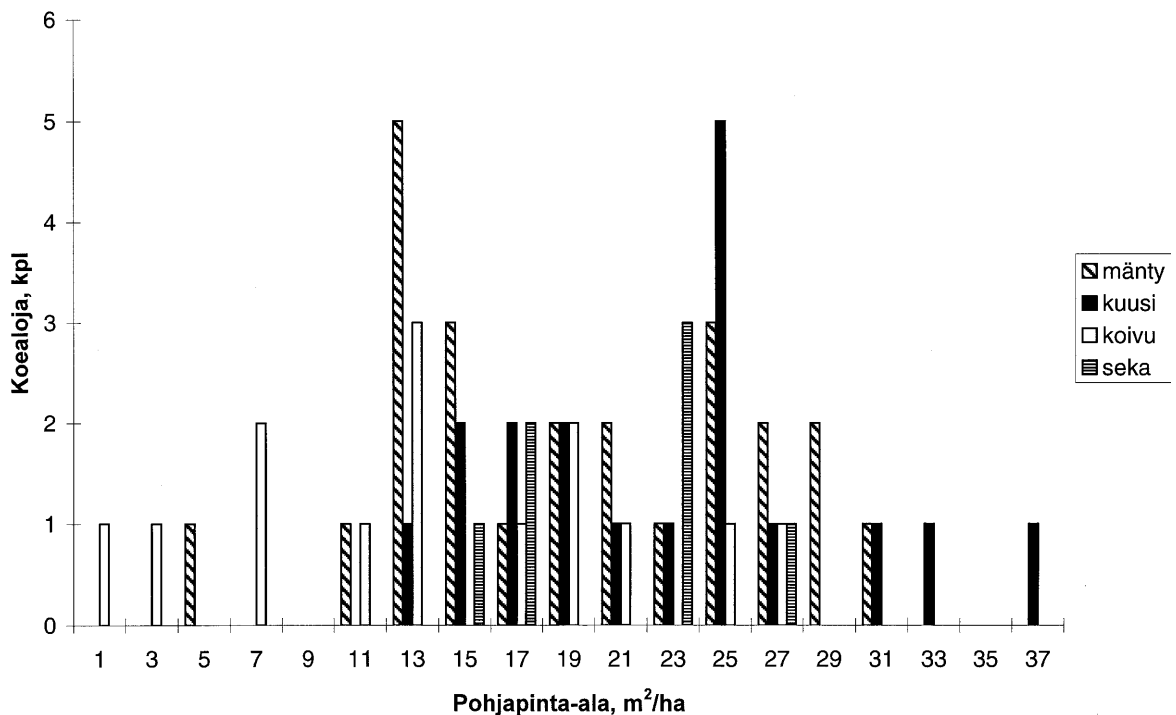
2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Kiteen aineisto

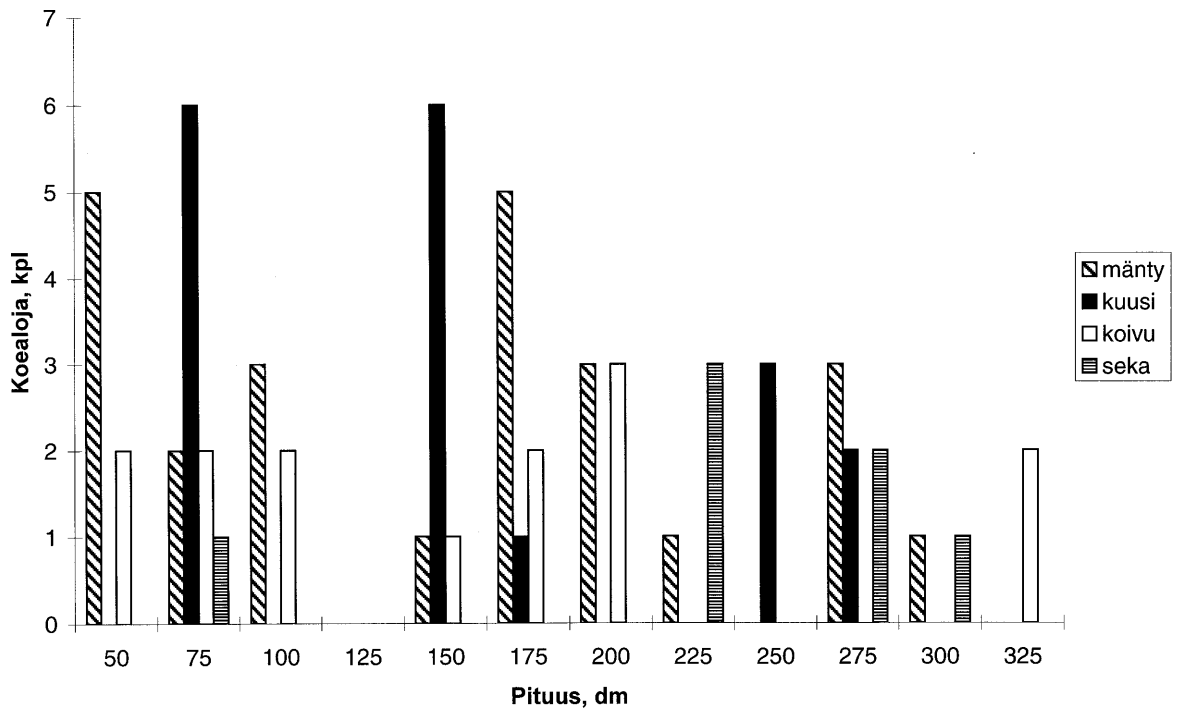
Kiteeltä, Pohjois-Karjalasta, mitattiin syyskuun alussa vuonna 1997 yhteensä 63 koealaa erilaisista metsiköistä. Koealoista 24 oli männiköissä, 18 kuusikoissa, 14 koivikoissa ja 7 erilaisissa sekametsissä. Pohjois-eteläsuunnassa koealojen maksimietäisyys oli noin 16,0 km ja itä-länsisuunnassa noin 7,1 km. Koealojen jakautuminen eri pohjapinta-ala- ja

pituusluokkiin on esitetty kuvissa 1 ja 2. Koealojen oikeiden koordinaattien määrittämiseksi valittiin tukipisteiksi kiinteistöjen rajapyykkejä ja pellonkulmia tms. pisteitä, jolle saatiin kartalta (mittakaava 1:10 000) koordinaatit melko tarkasti, sekä kahta kolmiomittauspistettä (P = 6884604,628 m, I = 4507708,421 m ja P = 6889493,775 m, I = 4510625,416 m). Kustakin tukipisteestä siirryttiin metsään 0–30 m, ja näin saatuun paikkaan sijoitettiin koealan keskipiste. Siirtyminen tehtiin siten, että tulevasta koealan keskipisteestä oli näköyhteys tukipisteeseen. Ympäristöstään poikkeavia pienialaisia kohtia (aukkoja ja tihentymiä) pyrittiin välttämään keskipistettä valittaessa. Koealakeskipisteen suunta tukipisteestä mitattiin bussolilla ja etäisyys Forestor Vertex -etäisyysmittarilla. Koealalta mitattiin puuston pohjapinta-ala puulajeittain (mänty, kuusi, lehtipuut), keskipituus ja -läpimitta sekä lähimmän puun etäisyys, läpimitta ja puulaji. Kaikki mittaukset tehtiin sateettomissa olosuhteissa ja puuden ollessa lehdessä.

Kiteen GPS-mittaukset tehtiin kahdeksankanavai-



Kuva 1. Koealojen jakautuminen pohjapinta-alaluokkiin Kiteen aineistossa.



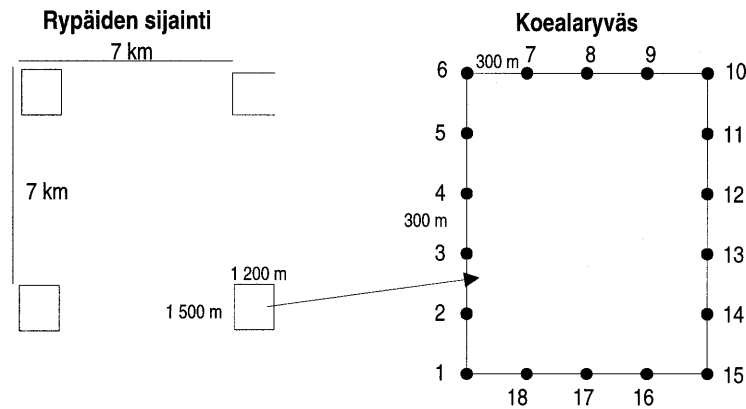
Kuva 2. Koealojen jakautuminen pituusluokkiin Kiteen aineistossa.

sella Trimble Pro XR -vastaanottimella, johon yhdistetyssä TDC2-maastotallentimessa oli Asset Surveyor -ohjelma (versio 3.12). Vastaanottimessa oli sisäänrakennettu MSK-differentiaalikorjaussignaalin vastaanotin. Valmistaja ilmoittaa differentiaalikorjauksen jälkeen laitteen paikannustarkkuudeksi 68 %:n todennäköisyydellä 75 cm + 1 ppm × tukiaseman ja vastaanottimen välinen etäisyys (Trimble Pro... 1996) eli Kiteen aineistossa noin 85 cm. Differentiaalikorjauksen tekemiseen oli periaatteessa kolme eri mahdollisuutta: 1) YLEn FOKUS-palvelun RDS-korjaussignaali (reaaliaikainen), 2) MSK-korjaussignaali (reaaliaikainen) tai 3) korjaus jälkikäteen. YLEn korjaussignaalia kokeiltiin, mutta sen saanti havaittiin laitteen heikolla antennilla mittausalueella epävarmaksi. Jälkikäteen tehtävä korjaus olisi ollut mahdollista tehdä esim. Geodeettisen laitoksen Joensuun lähellä sijaitsevan kiinteän GPS-aseman keräämien tietojen perusteella (Ollikainen ym. 1997). Tutkimuksessa valittiin kuitenkin käytettäväksi Outokummun tukiasemalta saatava MSK-korjaussignaali, sillä sen avulla korjaus

saatiin reaaliaikaisesti ja signaalin saatavuus osoitettiin tutkimusalueella hyväksi.

Vastaanottimen antennin korkeus oli 2,0 m maanpinnasta. Mittauksissa käytettiin kolmiulotteista kartoitusta. PDOP-maksimiarvoksi (*Positional Dilution of Precision*) asetettiin 20, SNR-maksimiarvoksi (*Signal-to-Noise Ratio*) 6 ja korkeusmaskiksi 13°. PDOP-arvo kertoo satelliittigeometriasta: mitä pienempi ko. arvo on, sitä tarkemmin on mahdollisuus saada pisteen koordinaatit. PDOP-arvoja alle neljän pidetään erinomaisina, neljästä kuuteen hyvinä, kuudesta kahdeksaan melko hyvinä ja yli kahdeksan heikkoina. SNR-arvo on satelliittisignaalin voimakkuuden tunnusluku: mitä suurempi ko. arvo on, sitä voimakkaampi signaali on. Heikko signaali kertoo usein heijastuksista. Korkeusmaski määrittää minimin horisontin ja satelliitin muodostamalle kulmalle. Mittausajankohdat valittiin etukäteen siten, että vähintään viisi satelliittia olisi näkyvässä ja PDOP-arvo olisi enintään kuusi.

Kiteen GPS-mittauksissa paikan koordinaatit otettiin 20 mittauksen keskiarvona mittausvälin ollessa



Kuva 3. Koealojen sijainti Valtakunnan metsien 9. inventoinnin aineistossa Pohjois-Savossa ja Keski-Suomessa.

yksi sekunti. Jokaisesta havainnosta laitteisto tallensi koordinaattien lisäksi mm. jokaisessa erillisessä mittauksessa käytettyjen satelliittien määrän ja PDOP-arvon.

GPS:llä mitattujen ja ”todellisten” sijaintien väliset erot x-y-tasossa laskettiin Pythagoraan lauseella. ”Todelliset” sijainnit määritettiin kahdella eri tavalla. Ensimmäisessä menetelmässä sijainnin määrittämiseksi lähtökohdaksi otettiin tukipisteelle kartalta mitattu sijainti. Toisessa menetelmässä lähtökohdaksi käytettiin tukipisteelle GPS:llä mitattua sijaintia. Tällä menetelyllä haluttiin poistaa karttamittauksessa mahdollisesti ollutta virhettä. Laitteen mitattua z-koordinaattia ei käytetty tulosten analysoinnissa.

2.2 Pohjois-Savon ja Keski-Suomen aineistot

Valtakunnan metsien 9. inventoinnin (VMI) yhteydessä Pohjois-Savon ja Keski-Suomen metsäkeskusten alueilla mitattiin koealojen sijainti perinteisesti bussoliin ja mittanauhaan perustuen, minkä lisäksi näin sijoitetut koealat paikannettiin GPS-laitteella. Koealat sijoitetaan lohkolle aloittamalla mittaus kartalla ja maastossa tarkasti paikannettavissa olevasta aloituspisteestä, josta siirrytään mittanauhalla mittaamalla ja mahdollisuuksien mukaan esimerkiksi raja- tai sähkölinjaa edeten tai kompassisuuntaa käyttäen lohkolinjalle (ts. koealoja yhdis-

tävälle linjalle). Koealat sijoitetaan maastoon mittaamalla lohkolinjaa kompassia käyttäen. Lohkolinja ja koealojen sijainti tarkistetaan aina sopivan maastokohdan sattuessa linjan läheisyyteen ja mahdollinen linjan mittausvirhe kirjataan ylös ja korjataan seuraavalla koealavälillä (kuva 3).

GPS-laitteena Pohjois-Savon ja Keski-Suomen mittauksissa oli Garmin GPS 45 yksikanavainen laite. Mittauksissa käytettiin YLEn FOKUS-palvelun RDS-korjaussignaalia (10 m:n tarkkuus) ja GPS-mittaus toistettiin 5 kertaa jokaisella koealalla, jolle saatiin RDS-signaali ja yhteys vähintään kolmeen satelliittiin. Paikannukseen käytettyjen satelliittien lukumäärä, PDOP ja VDOP (*Vertical Dilution of Precision*) tallennettiin muistiin jokaisesta paikannuksesta. Aineistosta poistettiin selvät mittausvirheet, joissa perinteisen paikannuksen ja GPS-paikannukset erosivat yli 200 m. Tällöin jäljelle jäi 539 koealaa 184 VMI-lohkolla. VMI-aineistossa oli edustettuna kattavasti eri ikäluokat ja puulajivaltaisuudet.

3 Tulokset

3.1 Kiteen kolmiomittauspisteet

Ensimmäinen kolmiomittauspiste (P = 6884604,628 m, I = 4507708,421 m) sijaitsi sekametsässä, jonka puuston pohjapinta-ala oli 23 m²/ha ja keskipituus

21,9 m. GPS-vastaanotin sai signaalia viidestä satelliitista ja PDOP-arvo oli 3,2. Poikkeama kolmiomittauspisteelle Maanmittauslaitoksesta saaduista koordinaateista oli 0,81 m. Sekä P- että I-koordinaatit olivat GPS-mittauksessa pienempiä kuin oikeat koordinaatit (erot: P 0,47 m ja I 0,66 m).

Toinen kolmiomittauspiste (P = 6889493,775 m, I = 4510625,416 m) sijaitsi pellon ja nuoren mäntymetsän (puuston pohjapinta-ala 24 m²/ha ja keskipituus 9,8 m) rajalla. Tässä pisteessä oli käytettävissä kuuden satelliitin signaalit ja PDOP-arvo oli 4,6. Eroksi tuli tässä tapauksessa 0,73 m. Sekä P- että I-koordinaatit olivat suurempia kuin oikeat koordinaatit (erot: P 0,44 m ja I 0,58 m).

3.2 Kiteen muut koalat

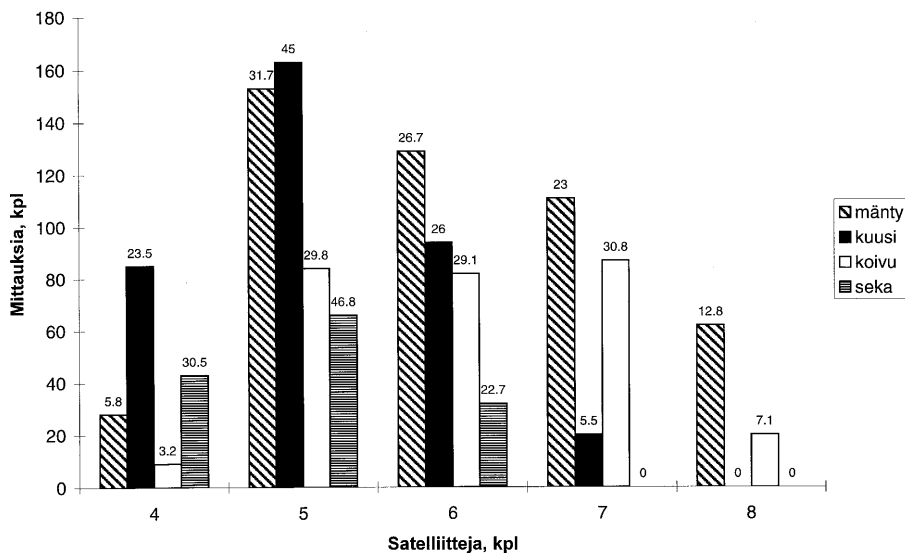
Varsinaisten koalojen mittauksissa satelliittien määrä vaihteli neljästä kahdeksaan. Yksittäisellä koalalla satelliittien määrä vaihteli mittauksen aikana. Vaihteluvälin suuruus oli tavallisesti yhden tai kahden satelliitin luokkaa, mutta kahdella koalalla vaihteluväli oli neljä satelliittia. Yhteys sa-

Taulukko 1. Satelliittien määrä eri puulajien metsiköissä (Kiteen aineisto).

	Satelliittien määrä				Keskihajonta
	Keskiarvo	Mediaani	Minimi	Maksimi	
Männikkö	6,05	6	4	8	1,08
Kuusikko	5,14	5	4	7	0,77
Koivikko	6,08	6	4	8	0,96
Sekametsä	4,92	5	4	6	0,75

Taulukko 2. PDOP-arvo eri puulajien metsiköissä (Kiteen aineisto).

	PDOP				Keskihajonta
	Keskiarvo	Mediaani	Minimi	Maksimi	
Männikkö	3,12	2,72	2,00	5,73	0,86
Kuusikko	4,85	4,22	2,00	8,75	2,12
Koivikko	3,61	3,00	1,90	11,54	2,43
Sekametsä	3,87	3,43	2,8	5,5	1,09



Kuva 4. Paikannuksessa käytössä olleiden satelliittien määrä eri puulajien metsiköissä Kiteen aineistossa. Pylväs osoittaa kuinka monessa mittauksessa tietty satelliittimäärä on ollut mukana ja pylvään päällä oleva luku on satelliittien määrän prosenttiosuus kaikista ko. puulajien metsiköiden mittauksista.

Taulukko 3. GPS:llä mitatun paikan sijainnin ero kartalta saatuaan sijaintiin nähden. Suluissa olevat tulokset on laskettu käyttäen alkupisteen (pellonkulma tai rajapyykki) koordinaattina GPS:llä saatua arvoa (Kiteen aineisto).

	Keskiarvo	Mediaani	Ero, m		Keskihajonta
			Minimi	Maksimi	
Männikkö	3,25 (1,93)	2,00 (1,44)	0,59 (0,00)	14,68 (8,14)	3,23(1,89)
Kuusikko	6,35 (1,58)	5,81 (1,48)	1,92 (0,34)	12,62 (3,50)	3,52 (0,91)
Koivikko	5,07 (1,57)	3,26 (0,93)	0,22 (0,08)	15,96 (6,48)	4,95 (1,64)
Sekametsä	5,04 (1,98)	2,68 (1,14)	0,64 (0,00)	13,55 (6,87)	5,34 (2,44)

telliitteihin pysyi katkeamattomana koko 20 sekunnin mittausajan 60:lla koealalla 63:sta. PDOP-arvo oli yhdeksällä koealalla osan mittausajasta yli kahdeksan. Parhaiten yhteys satelliitteihin saatiin männiköistä ja koivikoista ja heikoiten sekametsistä (taulukko 1, kuva 4). PDOP-arvot olivat alimpia (parhaita) männiköissä ja korkeimpia kuusikoissa (taulukko 2). Differentiaalikorjaussignaalin saannin kanssa ei ollut ongelmia missään metsiköissä.

Kartalta määritettyjen ja GPS:llä saatujen koordinaattien poikkeamien itseisarvojen keskiarvo oli 4,74 m. Pienimmillään ero oli 0,22 m ja suurimmillaan 15,96 m (taulukko 3). Eron itseisarvon P-komponentin keskiarvo oli 3,15 m (mediaani 2,22 m) ja I-komponentin keskiarvo oli 3,06 m (mediaani 1,66 m). Kun tukipisteen (rajapyykin tai pellonkulman) ”todellisena” sijaintina käytettiin GPS:llä tukipisteelle saatua arvoa, niin ero kartta- ja GPS-määrittäytymisen välillä oli keskimäärin 1,75 m. Suurimmillaan ero oli 8,14 m. Eron itseisarvon P-komponentin keskiarvo oli 1,46 m (mediaani 0,83 m) ja I-komponentin keskiarvo oli 0,67 m (mediaani 0,56m). Koealojen jakautuminen eroluokkiin on esitetty kuvissa 5 ja 6.

Eri puulajien metsiköissä erot vaihtelivat hieman. Kun vertailukohtana oli kartalta määritetty sijainti, niin suurimmat erot olivat keskimäärin kuusikoissa ja pienimmät männiköissä (taulukko 3). Männiköissä ero oli kolmella koealalla yli 6 m (12,5 %:lla männikkökoaloista), koivikoissa neljällä (28,6 %) ja kuusikoissa yhdeksällä (50 %) (kuva 5). Paikannusvirheen ja puustotunnusten välillä ei ollut kuitenkaan tilastollisesti merkitsevää riippuvuutta (ks. myös kuva 7).

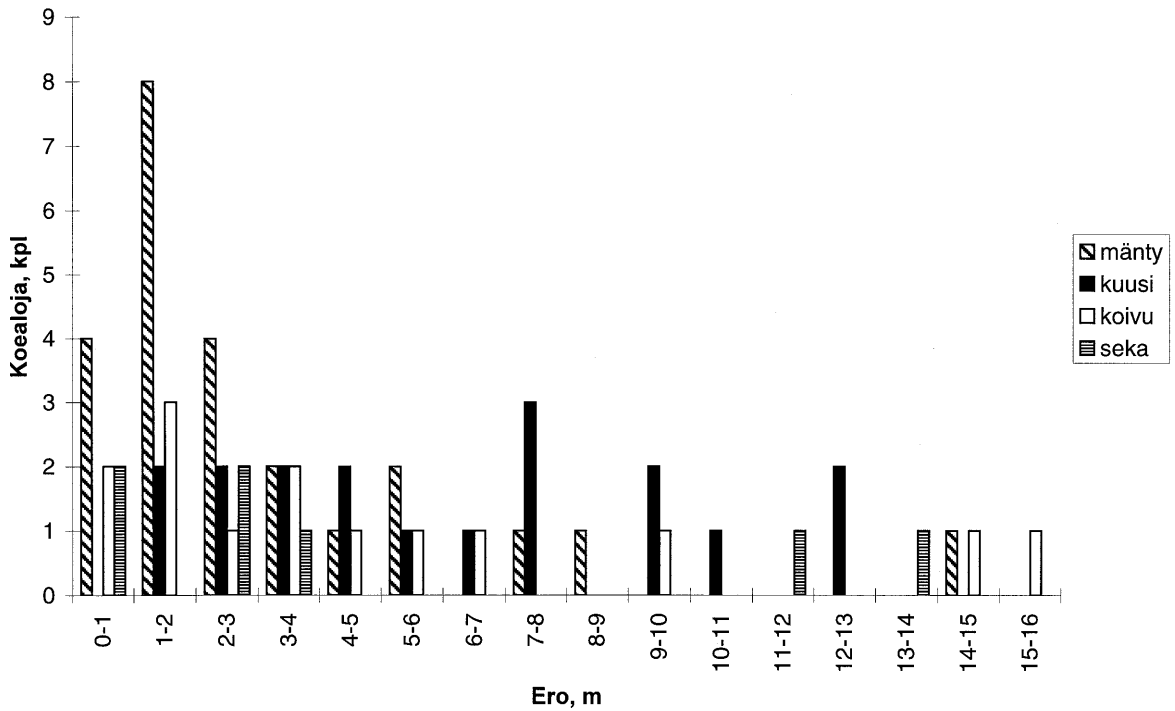
Kun tukipisteen sijainniksi otettiin GPS:llä saatu sijainti, tulokset muuttuivat edellä esitetystä. Ensimmäkin poikkeamat olivat pienempiä (taulukko 3, kuva 6). Toiseksi kuusikon ja koivikon tulokset olivat keskimäärin tarkimmat, ja epätarkimmat tulokset saatiin männiköistä ja sekametsistä. Erot eri puulajivaltaisuuksien välillä eivät kuitenkaan olleet tilastollisesti merkitseviä. Metsikön pohjapinta-alan ja pituuden vaihtelulla ei ollut vaikutusta mittaus-tarkkuuteen (kuva 7).

3.3 VMI-mittaukset

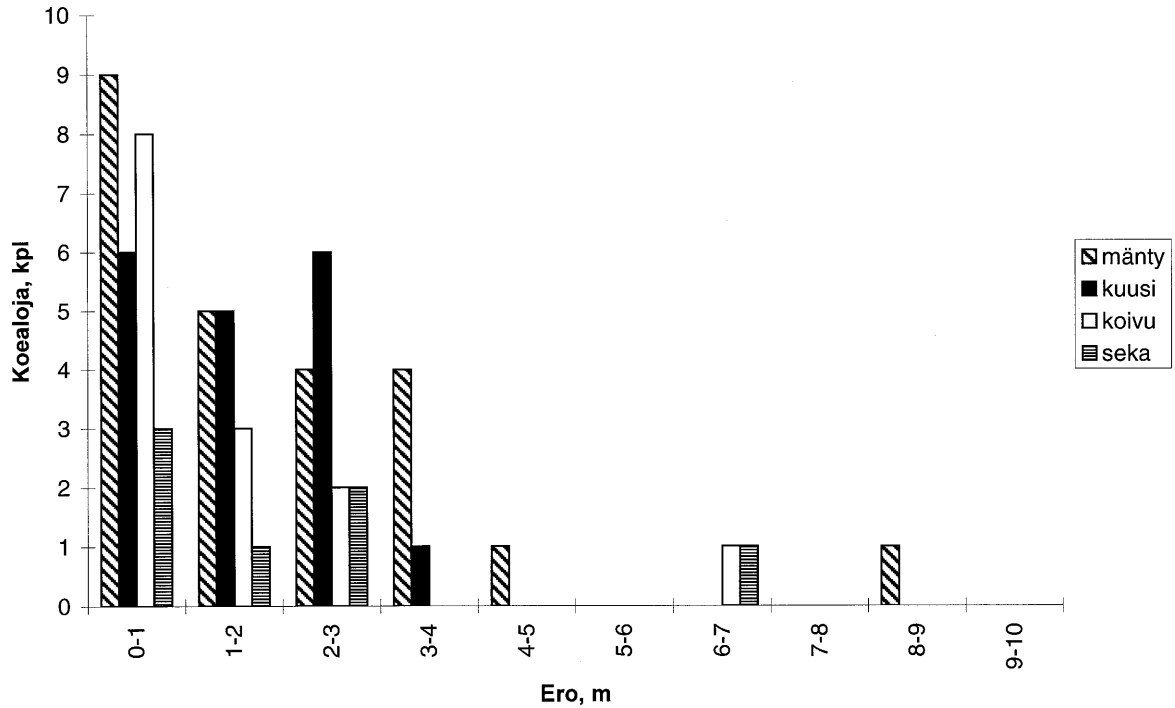
VMI-koealojen paikannuksessa havaitut siirtymät korjattiin koealojen koordinaatteihin ja koealoittaiset erotukset GPS-mittaus tuloksiin laskettiin kaikille viidelle samasta pisteestä tehdyille GPS-mittaukselle (taulukko 4). Ensimmäisestä GPS-paikannuksesta viidenteen mittaus-tarkkuus parani 3,9 m keskiarvona ilmaistuna ja 3,1 m mediaanina ilmaistuna. Ilmeisesti syynä paranemiseen oli mittausajan piteneminen.

Toisessa vaihtoehdossa VMI-lohkon keskipiste laskettiin mediaanina lohkon koealojen GPS-paikannuksista ja näin saatua estimaattia verrattiin lohkolle karttamittauksella saatuaan keskipisteeseen (taulukko 5). Lohkon GPS-paikannuksen tarkkuus parani ensimmäisestä paikannuksesta viidenteen.

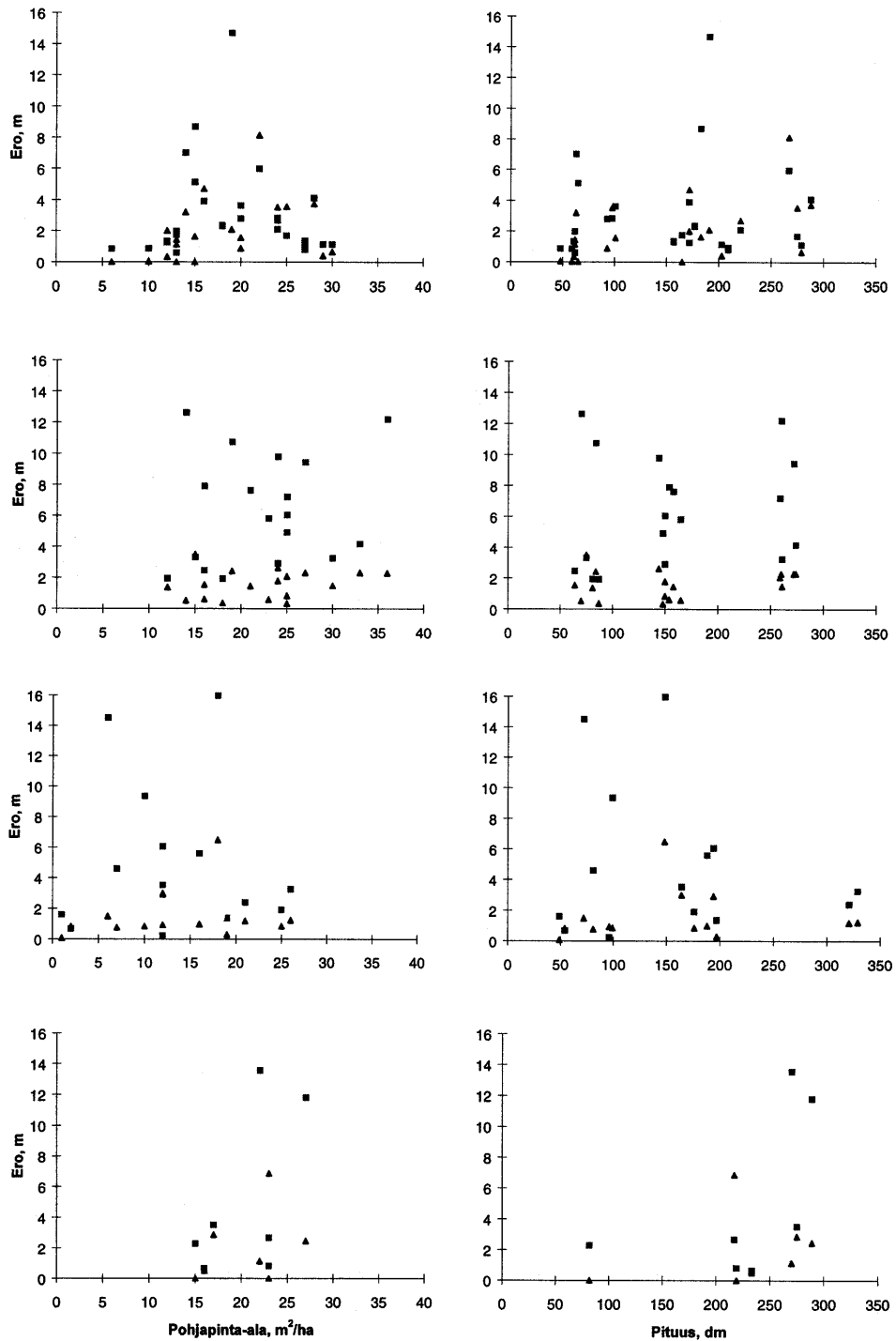
VMI-koealojen paikannukseen sisältyvän mahdollisen virheen arvioimiseksi aineistosta poimittiin otos, johon hyväksyttiin vain sellaiset lohkot, joiden aloituspiste oli mahdollisimman tarkasti paikannettavissa, esimerkiksi rajapyykki. Tällaisilta lohkoilta valittiin kolme aloituspistettä lähinnä olevaa



Kuva 5. Koealojen jakautuminen eroluokkiin, kun alkupisteinä on käytetty karttapisteitä (Kiteen aineisto).



Kuva 6. Koealojen jakautuminen eroluokkiin, kun alkupisteinä on käytetty GPS:llä mitattuja pisteitä (Kiteen aineisto).



Kuva 7. Eri puulajien metsiköiden virheet (erot) metsikön pohjapinta-alan ja pituuden suhteen Kiteen aineistossa. Neliöt kuvaavat eroja, kun alkupisteinä on käytetty karttapisteitä ja kolmiot eroja, kun alkupisteinä käytetty GPS:llä mitattuja pisteitä. a) männikkö, b) kuusikko, c) koivikko ja d) sekametsä.

Taulukko 4. VMI-koealojen GPS-paikannuksen tuloksen ero bussoli ja mittanauha -paikannustulokseen.

	Mittaus 1	Mittaus 2	Mittaus 3	Mittaus 4	Mittaus 5
Keskiarvo, m	35,8	33,9	33,4	32,6	31,9
Keskihajonta, m	39,4	39,0	38,8	38,6	38,5
Mediaani, m	23,4	21,7	21,0	20,6	20,3

Taulukko 5. VMI-lohkon GPS-paikannuksen tarkkuus verrattuna karttamittauspaikannukseen.

	Mittaus 1	Mittaus 2	Mittaus 3	Mittaus 4	Mittaus 5
Keskiarvo, m	28,0	26,1	25,8	25,1	24,4
Keskihajonta, m	30,0	28,9	28,8	28,8	28,9
Mediaani, m	19,0	17,5	17,2	16,9	15,3

Taulukko 6. GPS-paikannuksen ero VMI-koealojen paikannustulokseen lähellä aloituspistettä sijaitsevilla koealoilla.

	Mittaus 1	Mittaus 2	Mittaus 3	Mittaus 4	Mittaus 5
Keskiarvo, m	26,0	25,4	25,1	24,6	24,2
Keskihajonta, m	30,1	30,0	29,7	29,4	29,3
Mediaani, m	18,3	17,0	16,0	15,6	15,6

koealaa. Lisäksi vaadittiin, ettei aloituspisteen ja lohkolinjan välillä tai lohkolinjalla ole mitään vaikeasti ylitettäviä maastokohtia kuten mäkiä tai kosteikkoja, jotka voisivat aiheuttaa virhettä koealojen paikannukseen. Tähän tarkasteluun kuului 171 koealaa. GPS-paikannuksen tarkkuus näillä koealoilla on esitetty taulukossa 6. Paikannustarkkuus oli parempi kuin kaikki koealat käsittävässä aineistossa (taulukossa 4 esitetyt tulokset). Tulos viittaa siihen, että koealojen karttapaikannuksessa oli virhettä erityisesti kaikki koealat käsittävässä aineistossa.

Paikannustarkkuutta (ts. ensimmäisen GPS-paikannuksen ja kartalta mitatun paikan eroa) suhteessa satelliittien määrään ja PDOP- ja VDOP-tunnuk-

Taulukko 7. Ensimmäisen GPS-paikannuksen ja kartalta mitatun paikannuksen eron korrelaatio PDOP- ja VDOP-tunnuksiin ja satelliittimäärään (VMI-aineisto, lähellä aloituspistettä sijaitsevat koealat).

	Ero	PDOP	VDOP	Satelliittien lkm
Ero	1	0,077	0,102	-0,037
PDOP		1	0,549	-0,107
VDOP			1	-0,500
Satelliittien lkm				1

siin arvioitiin korrelaation perusteella (taulukko 7). Mainitut satelliittitunnukset eivät ko. aineistossa juuri korreloineet paikannustarkkuuden kanssa.

4 Tarkastelu

Kiteen aineistolla saadut tulokset osoittavat, että Trimble Pro XR GPS-laitteisto on tarkkuutensa puolesta käyttökelpoinen myös metsäolosuhteissa. Laitteiston paino ei ole este työskentelylle metsässä. Selkäreppuun kiinnitettävä antenni hankaloittaa kuitenkin jonkin verran liikkumista erityisesti tiheissä. MSK-differentiaalikorjaussignaalin saanti onnistui maasto-oloissa hyvin: vastaanotin sai poikkeuksetta korjaussignaalia, kun satelliitteja oli riittävästi mittauksiin.

Kiteeltä saadut tulokset osoittavat, että käytännössä vaadittava paikannustarkkuus täyttyy. GPS:llä määritettyjen ja kartalta mitattujen koordinaattien erojen itseisarvojen keskiarvo oli 4,74 m. Kun mahdollista karttamittauksen virheellisyyttä poistetaan käyttämällä tukipisteen koordinaattina GPS:llä saatua koordinaattia, ero oli keskimäärin vain 1,75 m. Tämä jälkimmäinen tulos antaa liian positiivisen kuvan paikannuksen tarkkuudesta, sillä tukipisteen määrittämisen virheen poistaminen poistaa myös muiden pisteiden määrittämisen virhettä, jos virheet korreloivat positiivisesti.

Tutkimuksessa saadut tulokset ovat samaa luokkaa kuin Hellströmin ja Johanssonin (1993a) saama keskimääräinen ero (noin 4 m) (ks. myös Deckert ja Bolstad 1996). Jasumback (1996) sai erilaisia GPS-

vastaanottimia Pohjois-Amerikan länsirannikolla testatessaan keskimääräiseksi eroksi 1,34–8,71 m (maksimi 2,16–19,58 m) laitteesta riippuen. Tutkimuksessa Trimble Pro XL oli tarkin laite; keskimääräinen virhe 1,34 m tai 2,68 riippuen differentiaalikorjausohjelmasta latvuston ollessa kuiva. Jasumbackin (1996) tulokset on saatu mittaamalla 13 tarkkaan tunnettua pistettä metsissä, jotka eivät vastaa Suomen metsiä (esim. puiden rinnankorkeusläpimitta 61–127 cm). Tämä tutkimus ja Jasumbackin (1996) tutkimus eivät ole suoraan vertailtavissa, mutta virheen suuruusluokkaa voidaan pitää samanlaisena. Jasumback (1996) on myös verrannut yhden laitteen tarkkuutta latvuston ollessa joko kuiva tai märkä. Latvuston ollessa märkä keskimääräinen virhe oli 2–4 kertaa suurempi kuin latvuston ollessa kuiva. Suurimmat syyt eroon lienevät monitieheijastus ja eri SNR-asetukset (Jasumback 1996). Jasumbackin ja Chamberlainin (1996) pinta-alan määrittämisen tarkkuutta koskevassa tutkimuksessa (laitteisto Trimble Pro XL) ei saatu eroa märän ja kuivan latvuston tilanteelle, kun käytettiin samaa SNR-asetusta.

Kiteen aineistolla saatujen tulosten perusteella metsikön puulajilla, puuston pituudella, pohjapinta-alalla tai muilla puustotunnuksilla ei ole juuri merkitystä paikannuksen tarkkuuteen, jos saadaan yhteys tarpeeksi moneen satelliittiin. Kuusikoissa GPS-paikannuksen tarkkuus on kuitenkin jonkin verran huonompi kuin muiden puulajien metsiköissä, mutta ero ei ole tilastollisesti merkitsevä. Havaintojen vähyys on voinut vaikuttaa siihen, etteivät tilastolliset testit osoittaneet merkitsevää riippuvuutta paikannuksen tarkkuuden ja puustotunnusten välillä. Tulokset tukevat ruotsalaisten Hellströmin ja Johanssonin (1993a) esittämiä tuloksia, joiden mukaan tarkkuus on metsäolosuhteissa hyvä, kun GPS-vastaanotin pystyy tekemään paikannuksen (ks. myös Courteau ja Darche 1997). Hämäläisen ja Räsäsen (1994) mukaan puuston tilavuus ja runkoluku eivät vaikuttaneet yhteyden saantiin vaan paikannus onnistui varsin hyvin myös runsaspuustoisissa kohdissa. Puustoltaan erittäin tiheän, vartuneen kasvatusmetsikön tapauksessa oli eniten ongelmia. Hämäläisen ja Räsäsen tutkimuksessa ei tarkasteltu paikannuksen tarkkuutta. Hyppänen ym. (1996) totesivat, että GPS:n toimivuus on melko hyvä männiköissä, mutta kuusivaltaisissa metsissä heikohko: vartunut männikkö ei juuri haitannut

paikannusta, tiheä nuori kuusikko sen sijaan esti tehokkaasti paikannussignaalin saatavuuden. Tutkimuksessa käytetty laite vastasi tässä tutkimuksessa Kiteen aineiston mittauksessa käytettyä laitetta. Hyppänen ym. (1996) eivät tutkineet varsinaista paikannuksen tarkkuutta metsäolosuhteissa. Molemmissa em. suomalaisissa tutkimuksissa paikannus oli dynaamista eli GPS-laitteisto mittasi kuljettaessa sijainnin tietyin väliajoin. Tulokset eivät ole siten vertailukelpoisia tämän tutkimuksen kanssa. Esimerkiksi monitieheijastus on merkittävämpi ongelma dynaamisessa paikannuksessa kuin yhden pisteen staattisessa paikannuksessa (Courteau ja Darche 1997). Tässä tutkimuksessa kahdeksankanaavainen GPS-vastaanottimen paikannustarkkuus oli erinomainen puustosta riippumatta. Monitieheijastus ei ilmeisestikään ole häirinnyt paikannusta.

Tässä tutkimuksessa tutkittiin laitteistojen tarkkuutta ainoastaan kaksiulotteisesti. Courteau ja Darchen (1997) tutkimuksen tulokset osoittavat, että vaikeissakin metsäolosuhteissa eri GPS-laitteiden tarkkuus pysyy hyvänä x-y-tasossa. Virheet ovat sen sijaan jopa kymmenkertaiset, jos tarkasteluun otetaan mukaan korkeus (ts. tarkastellaan tilannetta kolmiulotteisesti). Tämä osoittaa, että viimeaikaisesta voimakkaasta teknologian kehityksestä huolimatta, on z-koordinaatin epätarkkuus yhä ongelma.

Valmistaja suosittelee (Trimble Phase... 1996), että paikannuksessa olisi käytössä vähintään viisi satelliittia. Tämä ehto toteutui Kiteen aineistossa 49 koealalla. Samoin valmistaja suosittelee, että PDOP-arvo on enintään kuusi. Yli kuuden PDOP-arvoa oli 12 koealalla yhteensä 98 kpl. Kuitenkin vain kahden koealan tapauksessa arvo oli koko 20 sekunnin mittausajan yli kuusi. Suuret PDOP-arvot liittyivät lähes poikkeuksetta pieniin satelliittimääriin, mutta eivät kuitenkaan aina. Jos satelliittigeometria sattui mittaushetkellä olemaan suotuisa, niin neljällä satelliitilla päästiin pienempiin PDOP-arvoihin kuin kuudella satelliitilla. Eri puulajin metsiköiden satelliittien määrän keskiarvo oli yli viiden lukuunottamatta sekametsiä. Samoin PDOP-arvot pysyivät keskimäärin selvästi alle kuuden. Satelliittien määrät ja PDOP-arvot eivät vaikuttaneet paikannustarkkuuteen Kiteen aineistossa. VMI-aineistossakaan ko. tunnuksot eivät juuri korreloineet paikannustarkkuuden kanssa.

Kiteen aineistossa mittauspisteet valittiin välttämättä

pienialaisia tiheikköjä tai aukkoja metsikössä. Samoin tutkimuksessa ei mitattu koealoja, jotka olisivat sijoittuneet aivan mittauskelvottomiin paikkoihin. Tällaisia paikkoja olivat mm. isojen kuusten alaoksien peittämät alueet silloin, kun latvukset ulottuvat lähelle maanpintaa. Näin menetellen saatiin kaikille koealoille mitattua GPS:llä koordinaatit ja pystyttiin laskemaan paikannusvirheet.

Kiteen aineiston koealojen karttapaikantamiseen liittyi muutamia epävarmuustekijöitä, jotka voivat vaikuttaa tuloksiin. Tunnetun pisteen paikka oli vain yhdellä koealalla tarkka: yksi koeala mitattiin käyttäen koealan keskipisteenä kolmiomittauspistettä. Neljän koealan paikat oli määritetty käyttäen kolmiomittauspistettä tukipisteenä. Muiden koealojen paikat olivat joko rajapyykin kohdalla tai mitatulla etäisyydellä ja suunnalla rajapyykistä tai pellonkulmasta. Näillä koealoilla kartalta määritettyyn ”todelliseen” sijaintiin aiheutuu virhettä siitä, että rajapyykkien tarkkaa sijaintia ei ole saatavissa (sijainnit oli digitoitu 1:10 000 mittakaavaiselta kartalta). Pellon nurkat taas ovat maastossa monesti epämääräisemmän muotoisia kuin kartassa. Lisäksi virhettä aiheutuu suunnan ja etäisyyden mittauksesta.

Kiteen tutkimusaineisto pyrittiin saamaan resurssein puitteissa mahdollisimman kattavaksi. Kuitenkin 63 koealaa on varsin vähän tällaiseen tutkimukseen. Aineistosta jäi puuttumaan puuston pituusluokan 10–15 m metsiköt, samoin puustoltaan alle 5 m:n pituiset metsiköt. Männyllä muita pituusluokkia oli kohtuullisesti, mutta kuuselta puuttui kokonaan 18–25 m:n metsiköt ja koivulta 20–30 m:n metsiköt. Ko. pituusluokkien puuttuminen tuskin kuitenkaan vaikuttaa johtopäätöksiin. Sekametsiä oli määrällisesti vähän, joten niistä saaduista tuloksista ei voi tehdä pitkälle meneviä johtopäätöksiä.

Valtakunnan metsien inventoinnin koealoilla saatujen tulosten mukaan GPS-paikannus on selkeästi huonompi kuin Kiteen aineistolla saatujen tulosten mukaan. Aineistojen keruussa oli seuraavia eroja:

1. VMI:n koealat sijaitsivat maantieteellisesti laajemmalla alueella ja vaihtelevammassa olosuhteissa.
2. VMI:n mittauksissa paikannuslaitteena oli yksikanavainen Garmin GPS 45 ja Kiteen aineiston mittauksessa 8-kanavainen Trimble Pro XR.
3. Kiteen mittauksissa käytettiin MSK-signaaliin perustuvaa differentiaalikorjausta, VMI-mittauksissa YLEn FOKUS-palvelun RDS-signaalia.

4. Vertailupisteiden koordinaattien tarkkuus mittausmenetelmän vuoksi on ollut heikompaa VMI:ssa kuin Kiteellä.

Kiteen aineistossa voitiin aineiston pienuuden ansiosta keskittyä lähellä luotettavia tukipisteitä sijaitseviin koealoihin. VMI-aineistossa tukipisteiden laatu oli vaihtelevampi ja koealojen etäisyys tukipisteistä suurempi. Koealojen paikannus maastossa mittanauhan ja kompassin avulla on epäilemättä aiheutunut virhettä oikeana pidettyyn kartalta mitattuun sijaintiin. Rajaamalla VMI-aineistoa lähellä luotettavia tukipisteitä sijaitseviin koealoihin GPS:n luotettavuus näytti jonkin verran paremmalta, mutta poikkeamat olivat edelleen merkittävästi suurempia kuin Kiteen aineistossa. On huomattava kuitenkin, että rajatussakin VMI-aineistossa koealojen etäisyys tukipisteestä oli selvästi suurempi (jopa 600 m) kuin Kiteen aineistossa (maksimissaan 30 m).

Kiteen mittauksissa käytetyn MSK-signaaliin perustuvan differentiaalikorjauksen pitäisi Trimblen myyjän antamien tietojen mukaan antaa paikannusten virheeksi hyvissä olosuhteissa korkeintaan 1 m. VMI-mittauksissa käytetty YLEn RDS-signaaliin perustuvan korjauksen tarkkuudeksi on luvattu noin 10 m. FOKUS-palvelusta on saatavilla myös 2 m:n tarkkuutta lupaava korjaussignaali.

Valtakunnan metsien inventoinnissa koealojen sijainnin tarkalla tuntemisella on suuri merkitys etenkin silloin, kun koealatietaoa käytetään satelliittikuvien tulkinna tukiaineistona. Tässä tutkimuksessa käytetyllä Garmin GPS 45 -laitteella ja 10 m:n tarkkuuden RDS-korjaussignaaliilla ei päästy riittävään paikannustarkkuuteen. Toisella laitteistokoonpanolla, Trimble Pro XR ja 1 m:n tarkkuuden MSK-korjaussignaaliilla, saatu sijaintitieto sen sijaan oli riittävän tarkkaa esimerkiksi satelliittikuvatulkinnassa käytettäväksi. Tulosten perusteella näyttää siltä, että metsäoloissa ei yksikanavaisella GPS-laitteella päästä ainakaan kaukokartoitussovelluksia ajatellen riittävään paikannustarkkuuteen.

Kirjallisuus

- Bergström, J. & Olsson, H. 1993. Praktiska erfarenheter av GPS-mätning för beståndsavgränsning. Swedish University of Agricultural Sciences, Remote Sensing Laboratory, Arbetsrapport 1: 1–13.
- Courteau, J. & Darce, M.-H. 1997. A comparison of seven GPS units under forest conditions. Forest Engineering Research Institute of Canada, Special Report SR-120. 32 s.
- D'Eon, S. 1995. Accuracy and signal reception of a handheld Global Positioning System (GPS) receiver. *The Forestry Chronicle* 71(2): 192–196.
- Deckert, C. & Bolstad, P.V. 1996. Terrain and canopy influence on code-phase GPS position accuracy. Julkaisussa: Heit, M., Parker, H.D. & Shortreid, A. (toim.). GIS applications in natural resources 2. GIS World, Inc. s. 241–250.
- Hellström, C. & Johansson, S. 1993a. Exakta positioner och arealer med GPS. SkogForsk Resultat 13/1993.
- 1993b. Var går gränsen? –Arealbestämning av slutavverkningsbestånd med GPS-teknik. SkogForsk Resultat 14/1993.
- Holopainen, M., Hyppänen, H. & Pasanen, K. 1996. GPS-paikannus ja metsäsovellukset. *Metsänhoitaja* 2/1996: 23–26.
- Hyppänen, H., Pasanen, K. & Saramäki, J. 1996. Päätehakkuiden kuviorajojen päivitystarkkuus. *Folia Forestalia – Metsätieteen aikakauskirja* 1996(4): 321–335.
- Hämäläinen, J. & Räsänen, T. 1994. GPS-paikannus metsäolosuhteissa. *Metsätehon katsaus* 5/1994.
- Härkönen, E. & Kumpare, T. 1997. GPS-paikantimen hyödyntäminen vaatii harjaantumista. *Metsähallitus, Kehittämissyksikön tiedote* 8/1997.
- Jasumback, T. 1996. GPS evaluation: West Coast test site. USDA Forest Service, Missoula Technology and Development Center, Missoula.
- & Chamberlain, K. 1996. GPS traverse methods. USDA Forest Service, Missoula Technology and Development Center, Missoula.
- Johansson, S. 1993. GPS i återväxtplaneringen. SkogForsk Resultat 6/1993.
- & Gunnarsson, P. 1994. GPS och GIS för inventering och åjourhållning av vägnätet. SkogForsk Resultat 2/1994.
- Kruczynski, L.R. & Jasumback, A. 1993. Forestry management applications. Forest Service experiences with GPS. *Journal of Forestry* 91(8): 20–24.
- Leick, A. 1995. GPS satellite surveying. Wiley, New York. 560 s.
- Liu, C.J. & Brantigan, R. 1995. Using differential GPS for forest traverse surveys. *Canadian Journal of Forest Research* 25: 1795–1805.
- Ollikainen, M., Koivula, H., Poutanen, M. & Chen, R. 1997. Suomen kiinteiden GPS-asemien verkko. *Geodeettinen laitos, Tiedote* 16. 36 s.
- Räsänen, T., Lukkarinen, E. & Vuorenpää, T. 1997. Paikatietotekniikka puunhankinnassa ja metsänhoidossa. *Metsätehon raportti* 17. 31.1.1997. 23 s.
- Thor, M., Eriksson, I. & Mattsson, S. 1996. Automatisk datainsamling i maskinen. För förarstöd och uppföljning. SkogForsk Resultat 19/1996.
- Trimble Phase Processor. Software user guide. 1996.
- Trimble Pro XR. Receiver manual. 1996.
- Varjo, J. 1997. Change detection and controlling forest information using multi-temporal Landsat TM imagery. *Acta Forestalia Fennica* 258. 64 s.

23 viitettä