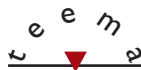


Mikko Vastaranta, Markus Holopainen, Harri Kaartinen,
Hannu Hyyppä ja Juha Hyyppä

Uudistuneet metsien maastomittaustarpeet



Maastomittausten tarpeellisuus

Puuston määrän ja laadun inventointi sekä metsävarojen käytön suunnittelu tarvitsee tuekseen metsässä tehtäviä maastomittauksia. Suomessa metsiä mitataan pääasiassa valtakunnan metsien inventointia (VMI) ja metsäsuunnittelua varten. Metsäsuunnittelussa maastomittaukset toteutetaan toistaiseksi kuvioittaisena arviointina. Kuvion puustotiedot määritetään kuvion sisälle subjektiivisesti sijoitettujen relaskoopikoealojen keskiarvona. Kuvioittaisessa arvioinnissa suuri osa mittauksista tehdään edelleenkin silmävaraisesti, joten mittajaan ammattitaidoilla on suuri merkitys. Mittajaan mukanaan tarvitsemat mittausvälineet ovat yleisimmin relaskooppi, mittasakset ja hypsometri. VMI perustuu koealaotantaan, jossa mitataan yleensä ympyräkoealoja. Koealat ovat kiinteäsäteisiä, mutta mitattavat puut valitaan relaskoopilla. Mittausvälineet ovat pääosin vastaavat kuin kuvioittaisessa arvioinnissa. Puustotietojen lisäksi koealalta määritetään keskipisteen koordinaatit GPS:llä. VMI:n pysyviltä koealoilta mitataan lisäksi puiden sijainnit suhteessa koealan keskipisteeseen bussolilla ja mittanauhalla. Ympyräkoealojen mittaaminen on hidasta ja työlästä verrattuna relaskoopikoealan mittaamiseen. Mittaamiseen kulunut aika riippuu mittajasta, koealan koosta ja puuston rakenteesta. Koealan mittaustehtäviin on jo olemassa automatisoituja tai puoliautomaattisia tekniikoita, mutta niistä ei ole vielä kehitetty maastoolosuhteissa täysin toimivia metsäsovelluksia.

Metsäsuunnittelussa ollaan siirtymässä puustoinventoinnin osalta harvapulsiseen laserkeilaukseen, aluepohjaiseen piirteiden irrotukseen ja ei-parametriseen arviointiin perustuvaan inventointimenetelmään. Arviointimenetelmän lähtökohtana on, että kukin otosyksikkö liitetään laserkeilaus- ja ilmakuvapiirteiltään lähimpiin maastossa mitattuihin otosyksiköihin. Näin jokaiselle tulkittavalle otosyksikölle saadaan liitettyä maastomittautieto. Uudessa metsäsuunnittelujärjestelmässä kuvioittaisen arvioinnin subjektiivisia maastomittauksia ei enää tarvita, vaan tarvittavat maastomittaukset tehdään tarkasti paikkaansidotuilta kiinteäsäteisiltä ympyräkoealoilta. Koealan mittaamiseen kuuluu koealan paikannus ja rajaus, läpimittojen luku, sekä koealoiden pituuksien mittaaminen. Koealan puustosta riippuu, mikä on mittauksen työläin vaihe. Keskeistä inventointimenetelmässä on, että jokaisesta tulkittavan metsäalueen ositteesta on oltava riittävä määrä koealoja, sillä maastoaineiston laatu ja osaltaan myös määrä on ratkaisevan tärkeää inventoinnin onnistumisen kannalta. Näin ollen aluepohjainen laserkeilausmenetelmä vaatii tuekseen laajan, tarkasti mitattavan maastoaineiston, jonka hankinta on uuden inventoinnin merkittävä kustannuserä. Koealataso, tarkkojen maastomittausten kehittäminen on ajankohtainen kysymys, sillä uusi yksityismetsien inventointi- ja suunnittelujärjestelmä pitäisi ottaa käyttöön jo vuonna 2010.

Tällä hetkellä lähinnä tutkimusasteella oleva yksittäisen puun tasolla tehtävä laserkeilausaineiston tulkinta vaatii tuekseen myös tarkkaa maastotietoa. Suurena etuna on kuitenkin se, että maastomittauksia tarvitaan huomattavasti vähemmän kuin aluepohjaisessa laserkeilausinventoinnissa, eli vain laserkeilausmittausten kalibrointiin. Todennäköisesti laajahkon (tuhansia hehtaareja) inventointialueen laserkeilausmittausten kalibrointiin tarvittaisiin muutamia satoja puita. Aluepohjaiseen laserkeilausinventointiin verrattuna mittausten on oltava vieläkin tarkemmin paikkaan sidottuja, jotta maastossa mitatut puut saadaan liitettyä kaukokartoitusaineistosta tulkittuihin puihin. Menetelmän ongelmakohtia ovat puiden paikantaminen sekä maasto- ja laserkeilausaineiston yhdistäminen. Korkeapulssisten laserkeilausaineistojen halventuessa yksinpuintulkintaa pidetään mahdollisena tulevaisuuden inventointimenetelmänä.

Uusien tarkentuneiden laserkeilaukseen pohjautuvien menetelmien mukanaan tuoma tarve tarkoille koealamittauksille luo ensimmäistä kertaa todellisen kysynnän uusille maastomittausmenetelmille. Yksi keskeinen kysymys on se, kuinka paljon koealoja käytännön aluepohjaisessa laserkeilausinventoinnissa lopulta tarvitaan, arvioita tästä ei vielä ole. Tarvittava määrä koealamittauksia pystytään varmasti tekemään lähivuosina myös perinteisin menetelmin, mutta inventointia voisi osaltaan tehostaa myös maastomittauksia kehittämällä. Nyt on tullut aika miettiä, kuinka aluepohjaisen laserkeilausinventoinnin referenssiaineistot tuotetaan ja kuinka tarvittavat maastomittaukset toteutetaan. Tässä artikkelissa esitellään laser- ja kuvamittaukseen perustuvia maastomittausvälineitä ja pohditaan mahdollisuuksia tarkentaa ja tehostaa metsien mittausta niiden avulla.

Mittalaitteet ja niiden kehittäminen

Perinteiset laitteet ja niiden kehittäminen

Metsien maastomittauksissa uutta tekniikkaa on hyödynnetty varsin hitaasti. Puuston mittaukset on jo kymmeniä vuosia toteutettu pääosin relaskoopilla, mittasaksilla, hypsometrillä ja mittanauhalla. Yksittäisiä laitteita on lähinnä räätälöity tutkimuk-

sen tarpeisiin käytännön maastomittauslaitteiden pysyessä samanlaisina. Merkittävimpiä uudistuksia perinteisiin maastomittauslaitteisiin ovat olleet puun pituuden mittauksessa ultraääntä tai laseria hyödyntävät etäisyyden- ja kulmanmittauslaitteet, jotka ovat osaltaan korvanneet hypsometrit, sekä läpimitan mittaukseen tarkoitettut elektroniset mittasakset. Molemmissa laitteissa on ollut mahdollista tallentaa mittaustulokset suoraan laitteiden muistiin. Perinteisten mittavälineiden etuna on ollut ennen kaikkea niiden helppokäyttöisyys, kestävyys ja edullisuus.

Käytössä oleva mittavälineistö rajoittaa osaltaan myös puista mitattavia tunnuksia. Esimerkiksi rinnankorkeusläpimitta on perinteisesti keskeisin yksittäisestä puusta mitattava tunnus, mutta kiinnostavampaa olisi pystyä mittaamaan koko runkomuoto. Perinteisin menetelmin yläläpimittojen mittaaminen on ollut epätarkkaa, eikä runkoprofiilin mittaaminen pystyistä ole ollut edes mahdollista. Puun runkotilavuuden lisäksi puun laatu on ratkaiseva tunnus puutuoteteollisuuden lopputuotteiden arvon näkökulmasta. Tukkien laatuun vaikuttaa mm. rungon suoruus, lenkous, puuaineen tiheys sekä oksien lukumäärä ja niiden koko. Perinteisesti tukkien laatua on määritetty lähinnä visuaalisesti, sillä ei ole ollut objektiivista menetelmää arvioida tukin laatua maastossa. Objektiivisesti ei ole ollut mahdollista mitata myöskään puun latvuspeittävyyttä tai tunnuksia luotettavaan kokonaisbiomassan määrittämiseen. Runkoprofiilin, oksikkuuden, latvustunnusten ja biomassan kuvaamiseen tarvittaisiin uusia mittaamenetelmiä. Kyseisille tunnuksille olisi tarvetta niin teollisuudessa kuin myös tutkimuksessa.

Useimpien maastomittauslaitteiden ongelmana on, että mittaaja joutuu liikkumaan paikaltaan jokaista mitattavaa puuta varten. Tavoitteena pitäisi olla, että mittaaja pystyy mittaamaan kaikki koealalta tarvittavat tunnuksot yhdellä ainoalla laitteella liikkumatta koealan keskipisteestä. Uuden teknologian tuonti metsäolosuhteisiin on ongelmallista. Mittalaitteen pitää olla kevyt ja helposti liikuteltava. Maastokelpoisen laitteen pitää kestää mm. vaihtelevia lämpötiloja, kosteutta ja pieniä kolhuja. Mekaanisten vaatimusten lisäksi monimuotoisessa metsäympäristössä tapahtuvien mittausten luotettava automatisointi on vaikeaa. Metsänmittauslaitteiden kehitystä ovat osaltaan hidastaneet rajalliset mark-

kinat. Pitkien tuotekehitysprojektien rahoittaminen ei ole houkutelut yrityksiä. Yksittäisten projektien rahoitus on usein loppunut jo ensimmäiseen prototyypivaiheeseen, eikä laitteen kehityksessä ole päästy juuri ideaa pidemmälle. Metsänmittauslaitteiden kehitys ei myöskään onnistu ilman poikkieteellistä yhteistyötä. Metsänhoitajilla on harvoin tarvittavaa osaamista tekniikan alalta, eikä insinööreillä taasen ole riittävää näkemystä käytännön maastotöiden vaatimuksista.

Laserrelaskoopista kohti laserkameraa

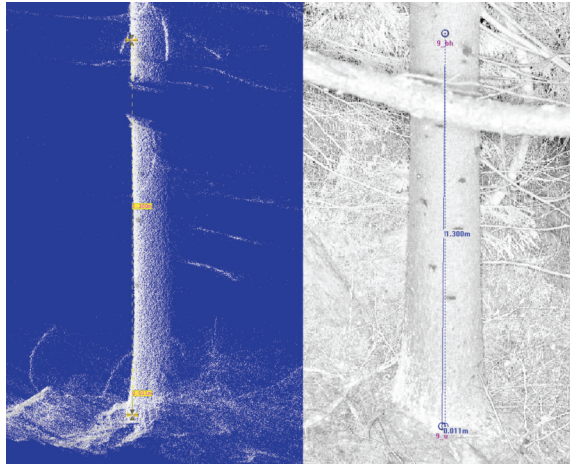
Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksella on kehitetty lasermittaukseen perustuvaa maastomittausmenetelmää 1990-luvun lopusta lähtien, jolloin aloitettiin laserrelaskoopin kehityshanke. Tavoitteena oli kehittää mittalaite, jolla koealan puusto voidaan mitata käymättä puiden luona. Mittalaite koostui säädettävästä relaskoopin hahlostasta, elektronisesta kompassista, kulma-anturista ja etäisyysmittarista, tiedonkeruuyksiköstä sekä GPS-vastaanottimesta. Laitteella voitiin mitata koealan runkolukusarja, puiden pituudet sekä sijainnit (suunta ja etäisyys) koealan keskipisteestä puita koskematta. Läpimitan mittaus perustui relaskoopin periaatteeseen, jossa relaskoopin hahlo säädettiin vastaamaan puun ääri viivoja, jolloin läpimita saatiin verrannon avulla, kun tiedetään etäisyys puuhun sekä relaskoopin hahlon leveys ja varren pituus. Parhaimmillaan laserrelaskoopilla on saavutettu läpimitan mittauksessa 8,2 mm:n keskihajonta, kun mittasaksien vastaavaksi tarkkuudeksi on raportoitu n. 5 mm. Läpimitan mittauksen ongelmana oli tarkkuuden riippuvuus mittaajasta. Virheitä aiheutti lähinnä relaskoopin hahlon säätäminen vastaamaan rungon ääri viivoja. Puun sijainti ja pituus saatiin mitattua vastaavalla tarkkuudella kuin perinteisissä maastomittauksissa. Vaikka laserrelaskoopissa oli vielä paljon tarvetta jatkokehitykselle, niin laite oli jo kykenevä haastamaan tehokkuudessa perinteiset menetelmät ympyräkoalojen mittaamisessa. Yksi mittaaja pystyi mittaamaan koealan puustotiedot ja puukartan koealan keskipisteestä käsin keskimäärin 15,5 minuutissa. Aiemmin ei kuitenkaan ollut samanlaista tarvetta ympyräkoalojen tehokkaaseen mittaamiseen kuin nyt uuden inventointijärjestelmän myötä.

Kameraperusteisilla mittajärjestelmillä on rungon läpimittoja, etenkin yläläpimittoja, yritetty mitata jo 1950-luvulta lähtien. Koejärjestelyt ovat olleet monimutkaisia ja mittaukset eivät täten ole olleet käytännöllisiä. Tosin mittaustarkkuuden osalta on päästy varsin hyviin tuloksiin jo varhaisessa vaiheessa. Digitaalikameroiden yleistyminen on tehnyt kamerasta varteenotettavan laitteen metsän mittaukseen. Toistaiseksi kuvan mittakaavaan ja mittauksen automatisointiin liittyvät ongelmat ovat pitäneet kameraan perustuvat mittausjärjestelmät lähinnä tutkimusasteella. Lisäksi käytännön näkökulmasta pelkkä läpimitan mittausominaisuus ei ole riittänyt, vaan samalla laitteella pitäisi saada mitattua myös muut koealalta tarvittavat tunnuksat. Kameraan pohjautuvia laitteita, joihin olisi liitetty pituus- ja sijaintitiedon mittausominaisuudet ei toistaiseksi ole kehitetty.

Laserrelaskoopin läpimitan mittausongelman poistamiseksi hankkeen seuraavassa vaiheessa kehitettiin laser- ja digikuvatekniikkaan perustuva mittalaite, laserkamera. Laserkamerassa läpimitan mittaus perustuu runkoon heijastettavaan laserviivaan ja pisteeseen, joiden avulla digitaalikuvasta voidaan mitata puun läpimita. Laserkameralla läpimitanmittaus on objektiivista, nopeaa sekä vaivatonta. Tähänastisten kokemusten perusteella laserkamera on potentiaalinen menetelmä kustannustehokkaaksi operatiivisen metsäsuunnittelun tiedonkeruulaitteeksi. Etenkin mittausnopeus on parantunut verrattuna laserrelaskoopiin uuden läpimitanmittausmenetelmän myötä. Laserkamera kaipaa vielä hieman jatkoa tuotekehitystä ennen kuin se on valmis käytäntöön. Laserkameraan pitää yhdistää laserrelaskoopin ominaisuudet määrittää puun sijainti ja pituus. Itse mittausmenetelmä on toimiva ja suurin osa laitteen jatkokehitystä on automatiikan säätämistä, sekä ohjelman käyttöliittymän kehitystä. Tavoitteena on, että laserkamera olisi ainoa laite, jota maastomittaja tarvitsee mukanaan.

Laserkeilaus metsän sisältä maalaserkeilaimella

Maalaserkeilaimella (Terrestrial Laser Scanning, TLS) tarkoitetaan useimmiten kolmijalalle sijoitettua laserkeilainta, joka voidaan sijoittaa halutulle kohteelle. Maalaserkeilain mittaa ympäristöstään



Kuva 1. Kuusen runko maalaserkeilaimella kuvattuna. Vasemmalla pistepilvi kohtisuoraan keilaussuuntaa vasten katsottuna (yläosassa näkyy rungon ja keilaimen välissä olevan oksan aiheuttama katvealue) ja oikealla pistekuva suoraan keilaimelta nähtynä, jossa kunkin mitatun pisteen intensiteetti-arvo (palaavan lasersignaalin voimakkuus) on kuvattu harmaasävyinä. Kuvassa näkyy myös pistepilvestä manuaalisesti tehtyjä mittauksia (puun tyvi ja rinnankorkeus).

kohteiden kolmiulotteiset koordinaatit suunnattua laseretäisyysmittausta käyttäen: suunta ja etäisyys kohteeseen mitataan, ja näiden perusteella lasketaan kohdepisteen kolmiulotteinen sijainti. Maalaserkeilaimet jaetaan etäisyysmittausperiaatteen perusteella kahteen luokkaan, pulssilaserkeilaimiin ja vaihe-erokeilaimiin. Pulssilaserkeilaimet määrittävät etäisyyden mittaamalla lyhyen laserpulssin kulkuajan keilaimesta kohteeseen ja takaisin. Vaihe-erokeilaimet lähettävät jatkuvaa lasersädettä, ja etäisyys määritetään lähtevän ja palaavan säteen vaihe-erosta. Pulssilaserkeilaimien voidaan katsoa sopivan paremmin laajojen alueiden kartoitusmittauksiin, jolloin etäisyys kohteeseen voi olla jopa kilometrin, kun taas vaihe-erokeilaimet ovat parhaimmillaan lähellä olevien kohteiden, kuten yksittäisten puiden ja koealojen yksityiskohtaisemmassa mittauksessa. Maalaserkeilainten tarkkuus puun sijainnin mittauksessa on alle 1 cm ja läpimitan mittauksessa noin 5 mm.

Maalaserkeilaimella voidaan tuottaa nopeasti tiheä kolmiulotteinen pistepilvi ympäröivästä puustosta (kuva 1.). Mittaukseen kuluva aika riippuu halutta-

vasta pistetiheydestä ja mittausalasta. Esimerkiksi nykyaikaisilla vaihe-erokeilaimilla koko ympäröivän tilan mittausta 70–120 metrin etäisyyteen asti kestää 2–4 minuuttia, kun pistetiheys on valittu niin, että 10 metrin päässä keilaimesta yksittäisten pisteiden välinen etäisyys on 6,3 mm. Toisin sanoen, 10 metrin päässä keilaimesta saadaan noin 25 000 pistettä neliömetrin alueelle. Tästä pistepilvestä voidaan mitata esimerkiksi näkyvien puiden sijainti, pituus, latvuspeitto, puulaji ja runkokäyrä. Vain keilaimelle suoraan näkyviä kohteita voidaan mitata, joten puuston tiheys, peitteisyys ja mittausteoria vaikuttavat siihen, mitä pistepilvestä näkyy ja kuinka hyvin siitä em. ominaisuudet ovat mitattavissa. Kuvassa 1 näkyy esimerkki yksittäisen oksan aiheuttamasta katvealueesta puun rungolla.

Metsikkökoekalan maalaserkeilaus voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla: yhtenä keilauksena koealan keskipisteestä, tai useampana keilauksena eri puolilta koealaa. Yhdestä pisteestä tehdyn keilauksen etuna on nopeus ja tallennetun pistemäärän suhteellinen pienuus. Haittapuolena ovat katvealueet, joita muodostuu puunrunkojen kaltaisten läpäisemättömien kohteiden taakse. Toinen yhdestä pisteestä tehdyn keilauksen ongelma on pistepilven tiheyden riippuvuus kohteen etäisyydestä keilaimesta; kaukana olevasta puusta saadaan siis vähemmän pisteitä kuin samankokoisesta lähellä olevasta, mikä vaikuttaa mallinnustarkkuuteen ja käytettävissä oleviin menetelmiin. Yhdistettäessä useita koealasta tehtyjä keilauksia vältytään katveiden ja epätasaisen pistetiheyden aiheuttamilta ongelmilta. Työmäärä tosin lisääntyy huomattavasti sekä maastossa että jälkikäsitellessä, kun eri keilauksia sovitetaan yhteen. Metsikkökoekalojen maalasermittausten automatisointia tutkitaan parhaillaan. Maalasermittausten yleistymisen esteenä on osaltaan ainakin toistaiseksi laitteiden kalleus ja etteivät ne sellaisinaan sovellu vaikeisiin maasto- tai sääolosuhteisiin.

Päätelmät

Käytännön koealamittauksiin soveltuva laserkamera tai maalaserkeilaimista kolmiulotteista aineistoa tuottavaa keilainta halvempi kaksikulotteista aineistoa tuottava keilain voisivat hyvin yleistyä maastomittauksissa seuraavan kymmenen vuoden aikana. Ko-

konaan perinteisiä menetelmiä ne eivät vielä pysty syrjäyttämään. Tiheät, peitteiset puustot, jotka ovat vaikeita mitata millä tahansa menetelmällä, ovat ainakin toistaiseksi optisten menetelmien ulottumattomissa. Käytännön mittauksia pystytään tehostamaan myös yhdistämällä nykyisin maastomittauksissa käytettäviä työkaluja yhteen laitteeseen, joka olisi suunnattu etenkin uuden inventointijärjestelmän mittaavaatimuksia vastaavaksi. Tästä esimerkkinä on Masser Oy:n elektronisten mittasaksien ympärille kehittämä mittalaite, Sonar Caliper, jossa on elektroniset mittasakset läpimitan mittaukseen, kulman ja etäisyyden (ultraääni) mittaussitteet sekä elektroninen kompassi puun sijainnin ja pituuden mittaukseen sekä mahdollisuus liittää GPS tarkkan sijainnin määrittämiseen. Laitteen merkittävin ero laserkameraan on, että mittaajan pitää edelleen liikkua jokaisen mitattavan puun luokse mittaamaan puun läpimita ja etäisyys koealan keskipisteeseen. Toisaalta, kun puun etäisyyden mittausta perustuu ultraääneen (lähetin ja vastaanotin) saadaan laitteella mitattua puukarta myös peitteisissä puustoissa. Sonar Caliper, laserkamera tai kaksiulotteista aineistoa tuottava keilain soveltuisivat parhaiten nykymuotoisten maastomittauksen tehostamiseen, kun taas kolmiulotteista aineistoa tuottava maalaserkeilaus tarjoaa joustavat mahdollisuudet liittää maastomittaukseen objektiivisesti kerättäviä tunnuksia, jotka ennen ovat olleet työläästi kerättävissä lähinnä vain tutkimuskäyttöön.

Tekniikat entistä objektiivisimpiin ja tarkempiin maastomittauksiin ovat pääosin jo olemassa ja niitä hyödynnetään laajalti rakennetun ympäristön kartoituksessa ja mittauksissa. Menetelmiä pitää kuitenkin edelleen kehittää, jotta niistä saadaan operatiiviseen metsänmittaukseen soveltuvia. Osaltaan uusien tekniikoiden yleistymiseen metsän mittauksessa vaikuttavat myös asenteet ja tahto uudistaa perinteistä metsän mittausta: uusia menetelmiä ei pidä nähdä uhkina, vaan kehittää niistä toimivia tulevaisuuden työkaluja.

Kirjallisuus

- Holopainen, M. & Kalliovirta, J. 2006. Modern data acquisition for forest inventories. In Kangas, A. & Maltamo, M. (eds.) 2006. *Forest Inventory – Methodology and Applications*. Springer Science & Business Media, Dordrecht, s. 343–362.
- Hyyppä, J., Hyyppä, H., Yu, X., Kaartinen, H., Kukko, H. & Holopainen, M. 2009. Forest inventory using small-footprint airborne lidar. Teoksessa: Shan, J. & Toth, C. (toim.). 2009. *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. CRC Press, Taylor & Francis, London. s. 335–370.
- Laasasenaho, J., Koivuniemi, J., Melkas, T. & Rätty, M. 2002. Puuston mittausta etäisyyden- ja kulmanmittauslaitteella. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2002: 493–497.
- X. Liang, P. Litkey, J. Hyyppä, H. Kaartinen, M. Vastaranta & M. Holopainen. 2009. Automatic stem location mapping using TLS for plot-wise forest inventory. Teoksessa: Popescu, S., Nelson, R., Zhao, K. & Neumannschwander, A. (toim.). *Silvilaser 2009 proceedings*, s. 314–323.
- Vastaranta, M., Melkas, T., Holopainen, M., Kaartinen, H., Hyyppä, J. & Hyyppä, H. 2008. Comparison of different laser-based methods to measure stem diameter. Teoksessa: Hill, R., Rossette, J. & Suárez, J. (toim.). 2008. *Silvilaser 2008 proceedings*, s. 606–615.

■ MMM Mikko Vastaranta, dos. Markus Holopainen, Helsingin yliopisto, Metsävarojen käytön laitos; DI Harri Kaartinen, Geodeettinen laitos; Dos. Hannu Hyyppä, TKK, Rakennetun ympäristön mittauksen ja mallinnuksen instituutti; prof. Juha Hyyppä, Geodeettinen laitos.
Sähköposti mikko.vastaranta@helsinki.fi