

Maanmittaus 78:1-2 (2003)

Saapunut 8.9.2003

Hyväksytty 31.10.2003

Metsähovin vaaitustestikentän ensimmäiset kaksi vuotta – liikkuvatko kalliokiintopisteet?

**Pekka Lehmuskoski, Paavo Rouhiainen, Veikko Saaranen,
Mikko Takalo ja Heikki Virtanen**

Geodeettinen laitos, Geodesian ja geodynamiikan osasto

PL 15 (Geodeetinrinne 2), 02431 Masala

pekka.lehmuskoski@fgi.fi, paavo.rouhiainen@fgi.fi, veikko.saaranen@fgi.fi,

mikko.takalo@fgi.fi, heikki.virtanen@fgi.fi

***Tiivistelmä.** Metsähovin vaaitustestikentällä on vuosina 2000–2002 suoritettu vaaituksia kuudessa eri jaksossa. Tarkkavaaituksella suoritettavat kiintopisteiden korkeudenmääritykset osoittavat, että Metsähovin vaaitustestikenttä sisältää sellaisia kallioon asetettuja kiintopisteitä, joiden korkeus muuttuu enemmän kuin mittaustarkkuus sallii. Korkeuden muutos saattaa olla jopa 3 mm. Tutkimus osoittaa, että mittausta edeltävien viikkojen keskilämpötila korreloi kiintopisteen korkeuden muutoksen kanssa. Maatutkamittauksen paljastama kallion ruuheisuus saattaa selittää osaksi havaitun korkeuden muutoksen.*

***Avainsanat:** tarkkavaaitus, kiintopisteiden liikkeet, maatutka, kalliomekaniikka.*

1 Johdanto

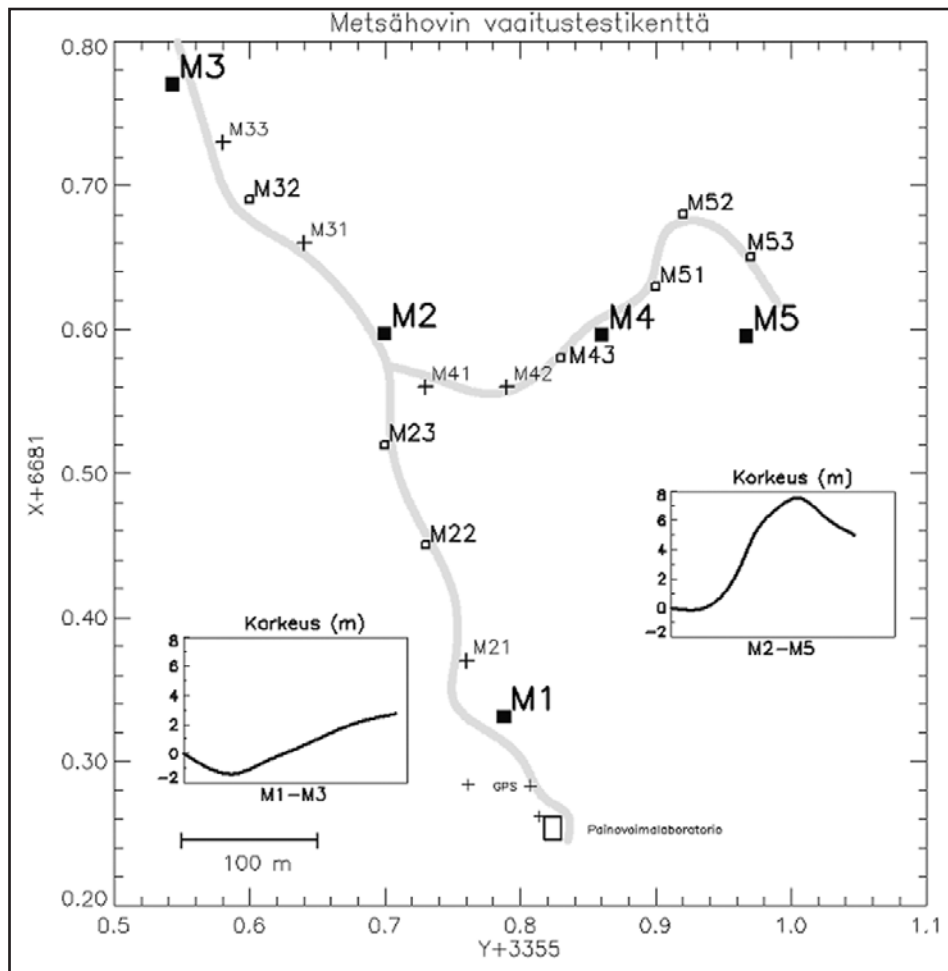
Suomessa peruskalliota on pidetty parhaana ja vakaana alustana sekä taso- että korkeuskiintopisteille. Esimerkiksi kansallisen tarkkavaaitusverkon kiintopisteet on perustettu kalliolle aina kun sitä vain on löytynyt. Perättäisten tarkkavaaitusten vertailu kiintopisteväleittäin, välin pituus keskimäärin 1,6 km, on tukenut tätä käsitystä kalliopisteiden luotettavuudesta. Myös epäilyttäviä tapauksia on löytynyt, sillä kallioon asetetun korkeuskiintopisteen on joskus todettu muuttaneen korkeuttaan enemmän kuin mittaustarkkuus, $< 1 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$, edellyttäisi (Lehmuskoski 1996).

Yrjö Väisälä havaitsi 1960-luvulla merkittäviä kalliokiintopisteiden horisontaaliliikkeitä Tuorlan observatoriossa (Väisälä 1967). Interferenssiperusviivan kallioon kiinnitettyjen perusviivapilarien vuotuinen liike, $0,5 \text{ mm} / 24 \text{ m}$, oli säännöllistä ja selvästi riippuvainen ilman lämpötilan kuukausikeskiarvosta.

Samanlainen ilmiö, mutta nyt korkeussuunnassa, havaittiin Geodeettisen laitoksen tarkkavaaituskojeiden testimittauksissa Eestinkylän testikentällä 1990-luvun alkuvuosina. Kahden 100 m päässä toisistaan olevan kalliopisteen korkeusero muuttui kevään ja syksyn mittausten välillä säännöllisesti 0,1–0,2 mm.

Lisää säännöllisesti tapahtuvia, mutta nyt odottamattoman suuria kalliopisteiden välisiä korkeuseron muutoksia, on havaittu vuoden 2000 lopulta lähtien Metsähovin vaaitustestikentän tarkkavaaituksissa. Mittauksia testikentällä on tehty säännöllisesti eri vuodenaikoina ja perättäiset vaaitukset erosivat joillakin kalliokiintopisteväleillä toisistaan mittaustarkkuutta enemmän.

Tässä kirjoituksessa on tarkasteltu Metsähovin testikentän mittauksia ja käsitelty vain kallioon kiinnitettyjen kiintopisteiden välisiä korkeuseroja sekä pyrittävä tuloksia analysoimalla löytämään kallioperän liikkeisiin vaikuttavia tekijöitä.

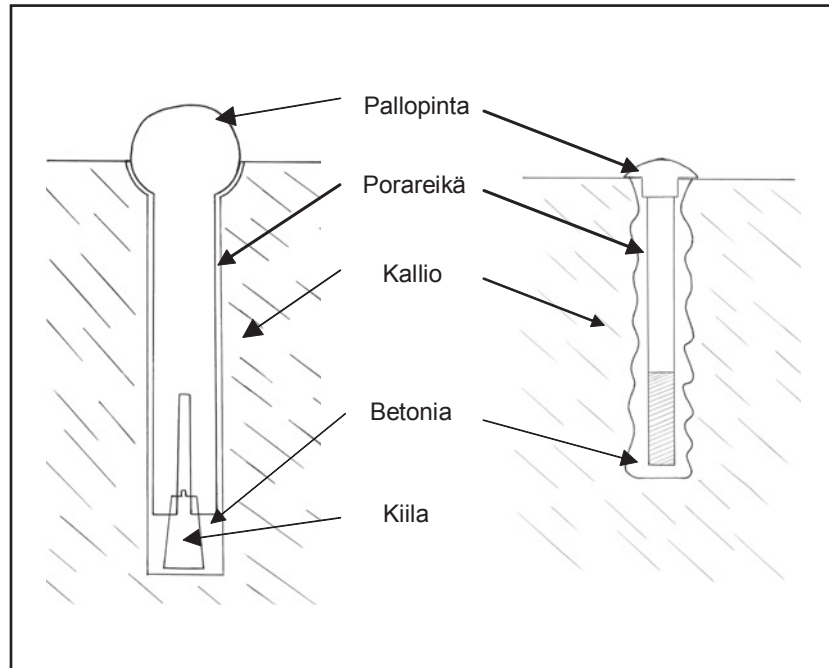


Kuva 1. Metsähovin vaaitustestikenttä. ■ = kiintopiste kalliossa, □ = apukiintopiste kalliossa, + = apukiintopiste maakivessä tai perustuksessa. Koordinaatit (km) ovat KkJ:ssä.

2 Metsähovin vaaitustestikenttä

Geodeettinen laitos päätti vuonna 2000 siirtyä tarkkavaaituksen kenttätöissä digitaalivaaitustekniikkaan ja hankki kolme Zeiss DiNi12 digitaalivaaituskojetta. Näiden mittausominaisuuksien ja -tarkkuuksien tutkimista varten maasto-olosuhteissa perustettiin vaaitustestikenttä, jossa lähes kaikki kiintopisteet ovat kalliossa. Testikenttä sijaitsee Metsähovin tutkimusaseman läheisyydessä Kirkkonummella Helsingistä 30 km länsiluoteeseen (Takalo et al. 2001).

Testikentän korkeuskiintopisteitä ovat viisi kalliopistettä, jotka muodostavat neljä kiintopisteväliä jakautuen kolmeen haaraan (kuva 1). Kullakin kiintopistevälillä on kolme apukiintopistettä, joita käytetään myös latta-alustoina. Kentän pisteistä 12 on kalliossa, 5 maakivessä ja yksi betonialustassa. Korkeuskiintopistepultit ovat ruostumattomasta teräksestä sorvattuja, kiilalla varustettuja pallopääpultteja (kuva 2a) ja apukiintopistepultit galvanoidusta teräksestä valmistettuja lukkopultteja (kuva 2b), jotka on upotettu porareikään juotosbetonilla.



Kuva 2. Korkeuskiintopiste ja apukiintopiste. Piirros: Carmen Cobalas, Stuttgartin yliopisto.

Testikentän kokonaispituus on 0,98 kilometriä ja sen korkeusprofiili on loiva: alimman ja ylimmän kiintopisteen välinen korkeusero on hieman yli 9 metriä (kuva 1). Vaaituskulkutiet pisteiden välillä ovat pääosin sora- ja hiekkateitä ja maisema vaaitusreitillä vaihtelee tiheästä kuusi- ja mäntymetsästä lähes puuttomaan kalliomaisemaan.

Taulukko 1. *Metsähovin testikentän vaaitukset vuosina 2000 – 2002. Havaitsijat: PLE = Pekka Lehmuskoski, PRO = Paavo Rouhiainen, VSA = Veikko Saarainen ja MTA = Mikko Takalo. Merkintä "Sat." tarkoittaa sitä, että havaitsija/vaaituskojeyhdistelmä on vaihdeltu pulttiväliltä toiselle sen päivän aikana.*

Päivämäärä	Vaaituskojeen tyyppi	Kojeen numerot	Lattaparien numerot	Havaitsija	Lämpötila °C
7.11.2000	Wild N3 Zeiss DiNi12	557975 320015	9404/9405 12927/13286	PLE MTA	6
8.11.2000	Wild N3 Zeiss DiNi12	557975 320015	9404/9405 12927/13286	PRO,VSA PLE, MTA	7
9.11.2000	Wild N3 Zeiss DiNi12	557975 320015	9404/9405 12927/13286	Sat. PLE, PRO,VSA	6
10.11.2000	Wild N3 Zeiss DiNi12	557975 320015	9404/9405 12927/13286	Sat. PLE, PRO,VSA	6
13.11.2000	Wild N3 Zeiss DiNi12	557975 320015	9404/9405 12927/13286	Sat. PLE, PRO,VSA	5
16.11.2000	Wild N3 Zeiss DiNi12	557975 320015	9404/9405 12927/13286	Sat. PLE, PRO,VSA	4
8.5.2001	Wild N3 Zeiss DiNi12	557975 320015	9404/9405 13987/13988	Sat. PLE, PRO,VSA	18
9.5.2001	Wild N3 Zeiss DiNi12	557975 320015	9404/9405 13987/13988	Sat. PLE, PRO,VSA	20
10.5.2001	Wild N3 Zeiss DiNi12	557975 320015	9404/9405 13987/13988	Sat. PLE, PRO,VSA	11
11.5.2001	Wild N3 Zeiss DiNi12	557975 320015	9404/9405 13987/13988	Sat. PLE, PRO,VSA	12
15.5.2001	Wild N3 Zeiss DiNi12	557975 320015	9404/9405 13987/13988	Sat. PLE, PRO,VSA	14
1.8.2001	Zeiss Ni002	423140	8619/8620	MTA	17
15.10.2001	Zeiss DiNi12	320015 320243 320244	14087/14090	VSA PLE PRO	5
16.10.2001	Zeiss DiNi12	320015 320243 320244	14087/14090	PRO VSA PLE	12
18.10.2001	Zeiss DiNi12	320015 320243 320244	14087/14090	PLE PRO VSA	9
22.10.2001	Zeiss DiNi12	320015 320243 320244	14087/14090	VSA PLE PRO	6
25.10.2001	Zeiss DiNi12	320015 320243 320244	14087/14090	VSA PLE PRO	7
3.5.2002	Zeiss DiNi12	320015 320243 320244	13926/14092	PLE PRO VSA	17
25.10.2002	Zeiss DiNi12	320015 320243 320244	14087/14090	VSA PLE PRO	7

3 Mittaukset

Testikentän tarkkavaaitukset aloitettiin v. 2000. V. 2002 loppuun mennessä niitä oli tehty kuudessa mittausjaksossa, säännöllisesti keväällä ja syksyllä sekä kerran kesällä elokuussa. Tiedot mittauksista ja niiden olosuhteista on koottu taulukkoon 1. Vaaituksissa käytetyistä kojeista Wild N3 on perinteinen vesivaakakoje, Zeiss DiNi12 digitaalinen vaaituskoje ja Zeiss Ni002 automaattivaaituskoje. Kaikki vaaituslatat olivat alumiinikehikkoisia Nedo-invarlattoja. Ilman lämpötila ja sen lämpötilaero, 2,5 metrin ja 0,5 metrin välillä maanpinnasta lukien, mitattiin Fluke 54 II lämpömittarilla, joka oli kiintopisteen M2 läheisyydessä pulttiväliä M1–M3 vaaitaessa ja lähellä kiintopistettä M4 pulttiväliä M2–M5 vaaitaessa. Etäisyydet vaaituskojeesta taka- ja etulattaan mitattiin yhtä pitkiksi kahden desimetrin tarkkuudella alun perin mittanauhalla ja mittaustilanteessa digitaalivaaituskojeen etäisyysmittauksella.

Vaaitushavainnoille suoritettiin seuraavat korjaukset: refraktiokorjaus Kukkamäen kaavalla (Hytönen 1967), lattakorjaus (Takalo 1985), lattaparin nollapistekorjaus, magneettinen korjaus Zeiss Ni002:lle (Kukkamäki ja Lehmuskoski 1984) ja vuoksikorjaus (Heikkinen 1978).

Tarkkavaaituslatat kalibroitiin ja lattaparin nollapistekorjaus määritettiin muutaman päivän kuluessa mittausjakson alkamisesta tai sen päättymisestä Geodeettisen laitoksen pystyasentoisella laserlattakomparaattorilla (Takalo 1999; Takalo and Rouhiainen 2002).

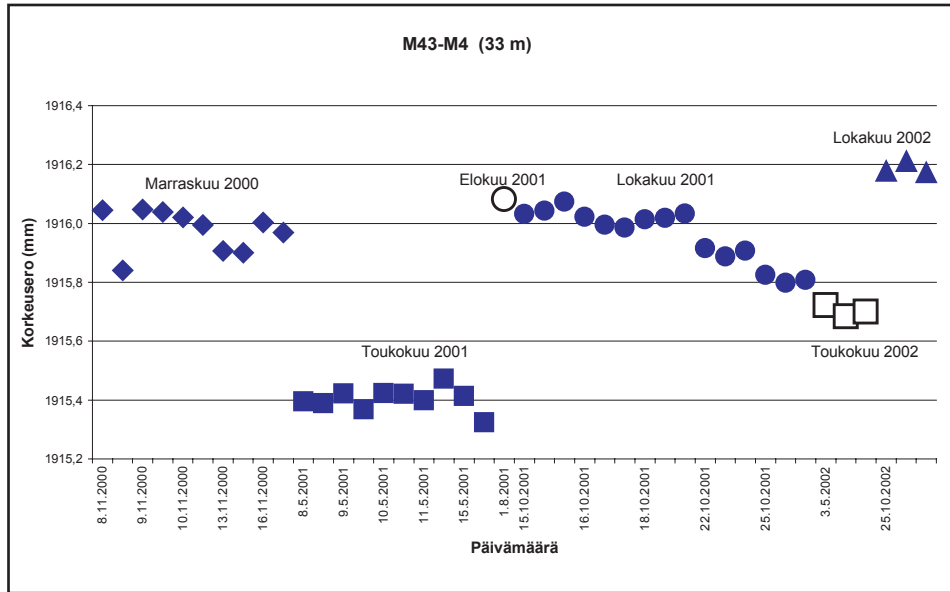
4 Mittaustulosten analyysi

Mittausjaksokohtaiset korkeuserot ja niiden hajonnat on kiintopisteväleittäin koottu taulukkoon 2. Korkeuserolla tarkoitetaan tässä pistevälin edestakaisten mittausten keskiarvoa. Koska mittausjaksossa elokuu 2001 on vain yksi edestakainen mittaus, hajontaa ei ole kyseiselle ajanjaksolle määritetty.

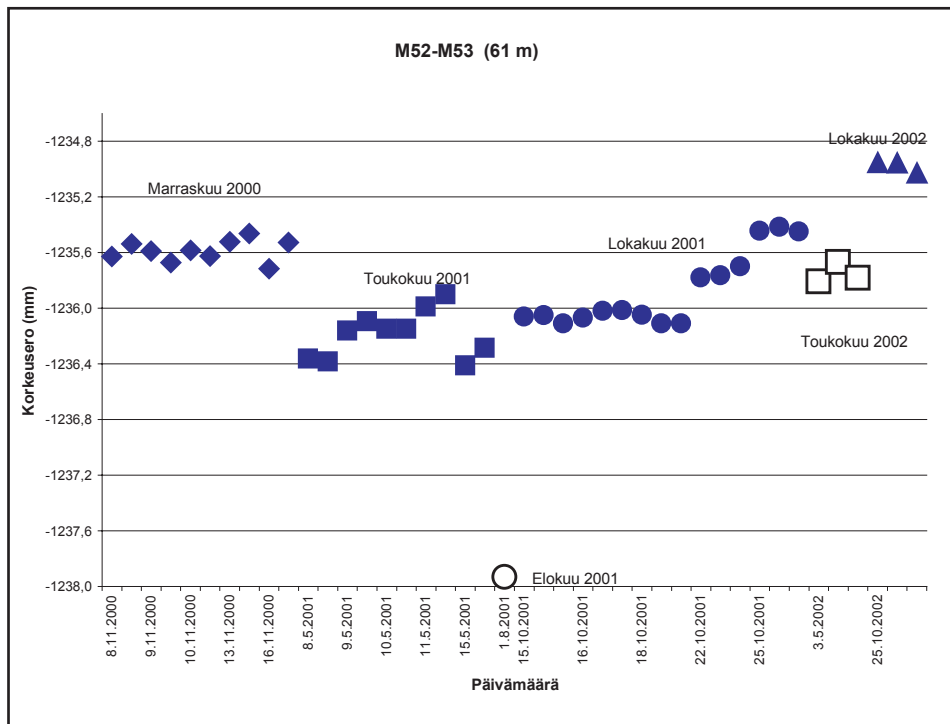
Mahdollisten kiintopisteliikuntojen löytämiseksi tarkastellaan kiintopistevälien korkeuseron muuttumista mittausjaksosta toiseen. Kuvat 3 ja 4 havainnollistavat esimerkkinä päivittäisen korkeuseron muuttumisen yksittäisillä väleillä (M43–M4) ja (M52–M53). (Kuvien aika-asteikko ei ole jatkuva.)

Kummassakin esimerkkitapauksessa korkeuseron riippuvuus mittausjaksosta on selvästi havaittavissa. Kuvassa 5 on verrattu kaikkien kiintopistevälien kunkin mittausjakson havaittua korkeuseroa ensimmäisen mittauksen (marraskuu 2000) korkeuseroon.

Tuloksista voidaan päätellä, millä kalliopistevälillä liikkumista on tapahtunut, mutta yksittäisen kiintopisteen liikkeen paljastamiseksi tarkastellaan vielä kunkin pisteen mittausjakson korkeuseroja kiintopisteen M2 suhteen ja verrataan näitä marraskuussa 2000 mitattuun vastaavaan korkeuseroon (kuva 6). Kuvasta käy ilmi, että apukiintopisteen M52 korkeus muuttuu eniten.



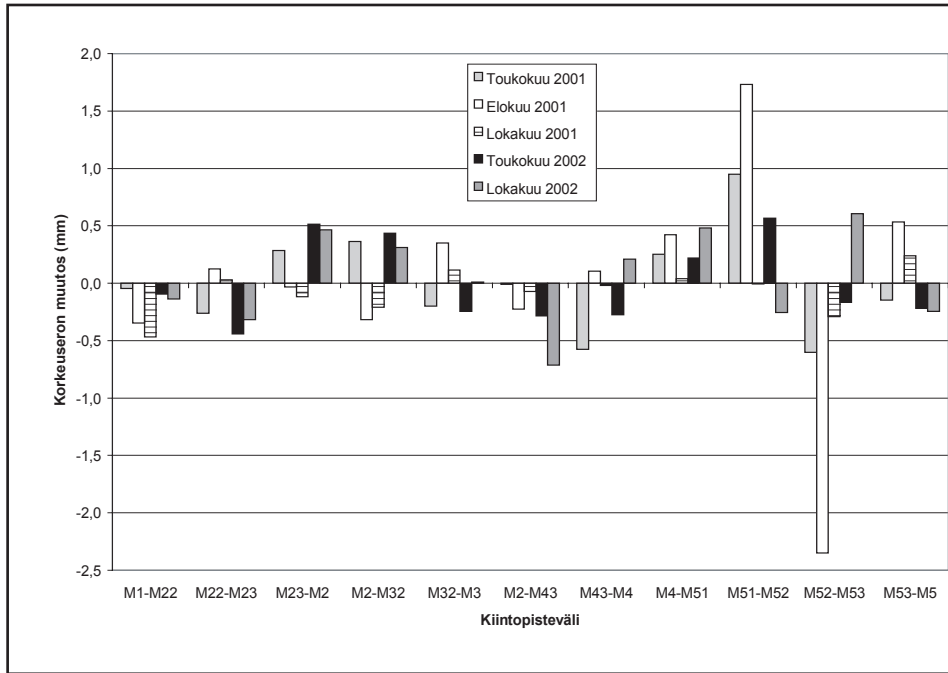
Kuva 3. Kiintopistevälin M43–M4 päivittäinen korkeusero.



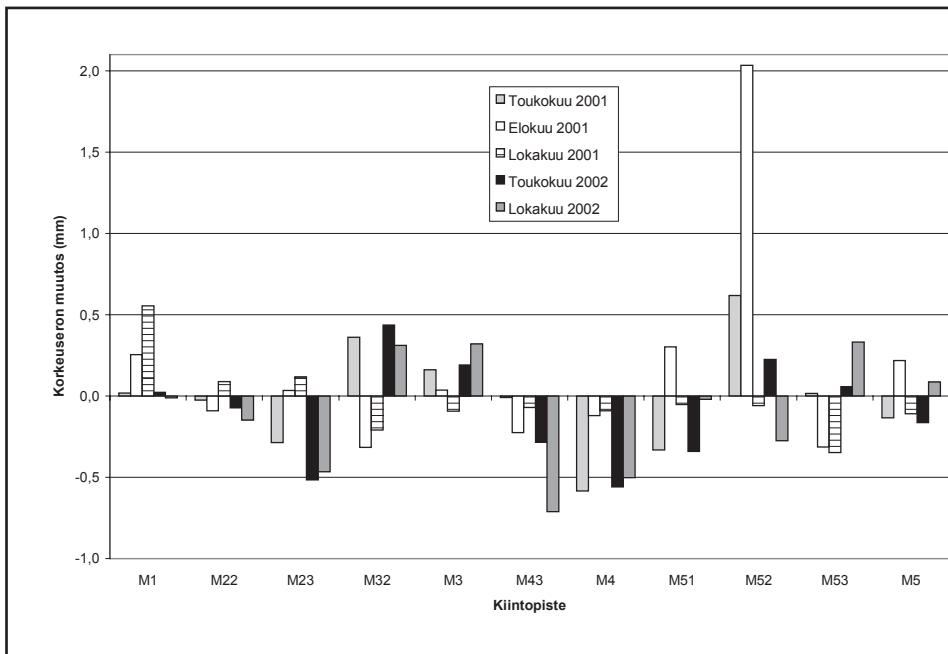
Kuva 4. Kiintopistevälin M52–M53 päivittäinen korkeusero.

Taulukko 2. Metsähovin vaaitustestikentän mittaustulokset (mm) v. 2000–2002.

Mittausjakso	Marraskuu 2000	Toukokuu 2001	Elokuu 2001
Vaaitusten lkm	10	10	1
Vaaituspäivien lkm	6	5	1
M1 – M22 131 m	-1360,47 ± 0,08	-1360,52 ± 0,09	-1360,82
M22 – M23 72 m	808,44 ± 0,06	808,18 ± 0,12	808,56
M23 – M2 75 m	875,35 ± 0,08	875,64 ± 0,09	875,32
M2 – M32 140 m	1692,06 ± 0,12	1692,42 ± 0,10	1691,74
M32 – M3 107 m	724,22 ± 0,10	724,02 ± 0,06	724,57
M2 – M43 172 m	2941,29 ± 0,13	2941,28 ± 0,10	2941,06
M43 – M4 33 m	1915,98 ± 0,07	1915,40 ± 0,04	1916,08
M4 – M51 54 m	1875,21 ± 0,09	1875,46 ± 0,08	1875,63
M51 – M52 60 m	796,02 ± 0,04	796,97 ± 0,24	797,75
M52 – M53 61 m	-1235,59 ± 0,08	-1236,19 ± 0,17	-1237,93
M53 – M5 76 m	-1299,81 ± 0,06	-1299,96 ± 0,07	-1299,28
Mittausjakso	Lokakuu 2001	Toukokuu 2002	Lokakuu 2002
Vaaitusten lkm	15	3	3
Vaaituspäivien lkm	5	1	1
M1 – M22 131 m	-1360,94 ± 0,05	-1360,57 ± 0,10	-1360,61 ± 0,04
M22 – M23 72 m	808,47 ± 0,06	808,00 ± 0,01	808,12 ± 0,04
M23 – M2 75 m	875,23 ± 0,09	875,86 ± 0,03	875,82 ± 0,03
M2 – M32 140 m	1691,85 ± 0,09	1692,49 ± 0,01	1692,37 ± 0,09
M32 – M3 107 m	724,34 ± 0,04	723,98 ± 0,06	724,23 ± 0,05
M2 – M43 172 m	2941,22 ± 0,11	2941,00 ± 0,04	2941,58 ± 0,06
M43 – M4 33 m	1915,96 ± 0,09	1915,70 ± 0,02	1916,19 ± 0,02
M4 – M51 54 m	1875,25 ± 0,04	1875,43 ± 0,06	1875,69 ± 0,02
M51 – M52 60 m	796,01 ± 0,16	796,58 ± 0,04	795,76 ± 0,03
M52 – M53 61 m	-1235,88 ± 0,26	-1235,75 ± 0,07	-1234,98 ± 0,04
M53 – M5 76 m	-1299,57 ± 0,08	-1300,03 ± 0,04	-1300,06 ± 0,02



Kuva 5. Kiintopistevälikohtainen mittausjakson korkeusero verrattuna marraskuussa 2000 mitattuun nähden.



Kuva 6. Kiintopisteiden liikkeet verrattuna M2:een marraskuussa 2000.

5 Kalliokiintopisteiden liikkumisen syyt

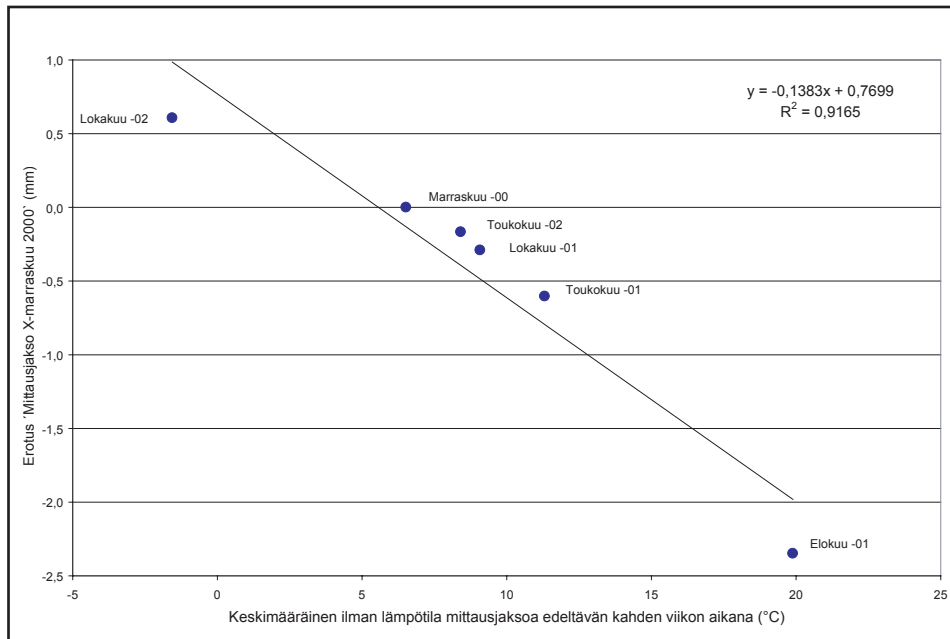
Vaaitusrefraktion vaikutus mittaustulokseen mikroilmastollisena ilmiönä ei selitä 2–3 mm korkeuden muutosta, sillä pisteen M52 vaaituksessa tähtäysväli oli 30 metriä ja korkeusero alle kaksi metriä ja lisäksi virheen vaikutus on otettu laskennallisesti huomioon mittaustuloksissa. Kallioperän lämpölaajeneminen ei myöskään selitä muutosta, koska graniitin lämpölaajenemiskerroin, n. 11 mm/m/°C ja mittausjaksojen väliset suurimmat lämpötilaerot 16 °C ovat vaikutukseltaan merkityksettömiä muutokseen verrattuna. Tutkimusten mukaan kallio testikentällä ei ole yhtenäinen, vaan on muodostunut eri kokoisista kalliopalasista ja niiden välisistä sedimenttikerroksista. Kallion palaset saattavat laajetessaan kiilata toisiinsa ylöspäin, mutta ko. vipumekanismin toteaminen on vaikeata. Kolmas selitys ilmiölle voisi olla pohjaveden korkeus tai paikallisen sademäärän muutokset, jotka vaikuttavat kalliopalasten välissä oleviin sedimenttikerrokseen (savea) ja tätä kautta kalliopalasten korkeuteen. Pohjavesihypoteesi kuitenkin hylättiin, koska havaitut pohjaveden pinnan korkeudet Metsähovin painovoimalaboratorion läheisyydessä eivät korreloineet havaittujen korkeuden muutosten kanssa. Yhtenä selityksenä ilmiölle voisi olla kalliossa esiintyvä jännityskenttä, jossa lämpötilan muutos saattaa aiheuttaa muutoksen puristusjännityksessä ja sen vaikutus voi tulla näkyviin kalliopalasten vipumekanismin välityksellä pisteen korkeuden muutoksena.

5.1 Kallion lämpötila

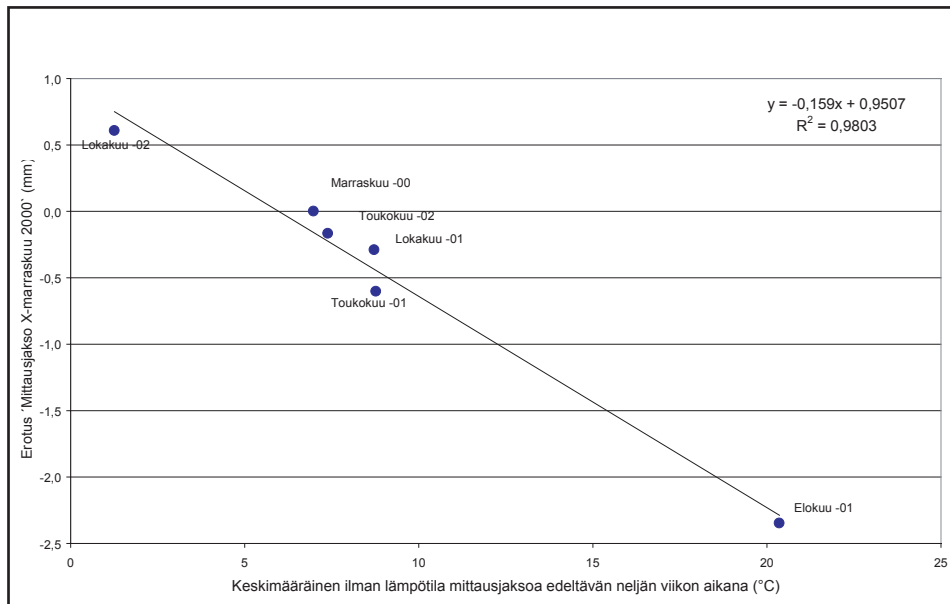
Koska testikentän mittauksissa kallion lämpötiloja ei mitattu suoraan, käytettiin kallion lämpötilan arvioimiseen ilman lämpötiloja. Lämpötila-aineisto saatiin Helsinki-Vantaan lentokentän säähavaintotilastoista. Koska lämmön johtumisnopeutta kalliioon ei tunnettu, testattiin mittausjaksoa edeltävän kahden, neljän ja kahdeksan viikon keskilämpötilojen edustavuutta korrelaatioanalyysillä. Kuvasarja 7, 8 ja 9 esittää kiintopistevälin M52–M53 korkeuseron muutoksen kahden, neljän ja kahdeksan viikon keskilämpötilan funktiona.

Vahvin korrelaatio kiintopistevälin M52–M53 korkeuseron muutoksen ja lämpötilan välille saadaan, kun lämpötilan seurantajakso on neljä viikkoa, ja heikoimmin, kun se on kahdeksan viikkoa. Kaikkien kiintopistevälien vastaavat korrelaatiokertoimien neliöt on koottu taulukkoon 3.

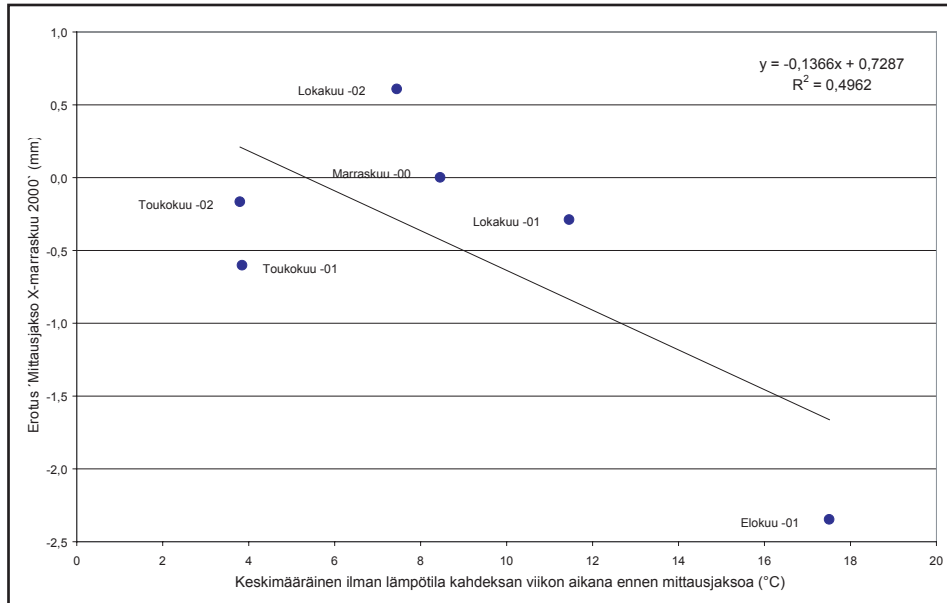
Taulukosta 3 käy ilmi, että seitsemän kiintopistevälin tapauksessa korkeuseron ja lämpötilan korrelaatio on suurimmillaan, kun lämpötilajakso on kahdeksan viikkoa. Sitä vastoin suurimman liikkeen kiintopiste M52 näyttää reagoivan lämpötilan muutokseen muuta nopeammin. Pisteen M52 ympärillä on muita kiintopisteitä enemmän paljasta kalliota.



Kuva 7. Kiintopistevälin M52–M53 korkeuseron muutos mittausjaksoa edeltävän kahden viikon keskilämpötilan funktiona.



Kuva 8. Kiintopistevälin M52–M53 korkeuseron muutos mittausjaksoa edeltävän neljän viikon keskilämpötilan funktiona.



Kuva 9. Kiintopistevälin M52–M53 korkeuseron muutos mittausjaksoa edeltävän kahdeksan viikon keskilämpötilan funktiona.

Taulukko 3. Havaitun korkeuseron ja mittausjaksoa edeltävän keskimääräisen ilman lämpötilan lineaarisesta riippuvuudesta laskettu korrelaatiokertoimen neliö (R^2). Merkintä vk tarkoittaa viikkojen lukumäärää keskilämpötilan laskennassa.

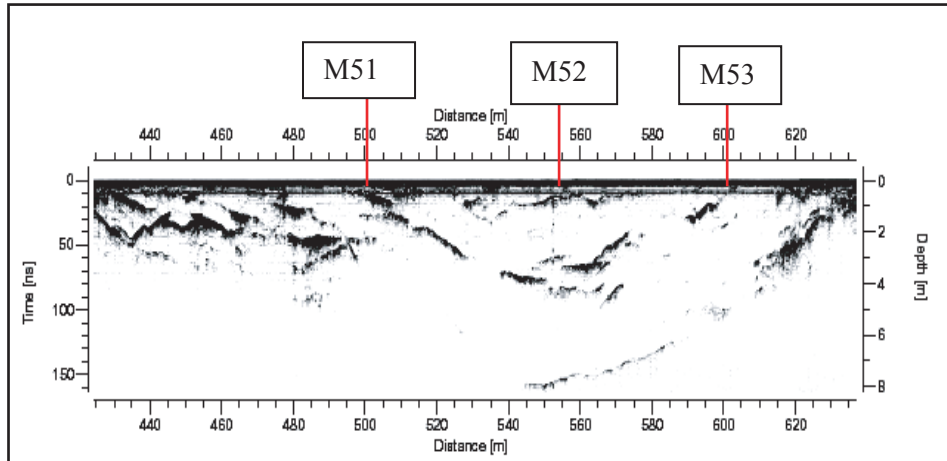
vk	M1 –M22	M22– M23	M23– M2	M2 –M32	M32– M3	M2 –M43	M43– M4	M4 –M51	M51– M52	M52– M53	M53– M5
2	0,16	0,30	0,27	0,31	0,20	0,30	0,05	0,00	0,82	0,92	0,60
4	0,22	0,41	0,31	0,46	0,40	0,16	0,00	0,02	0,79	0,98	0,75
8	0,52	0,74	0,54	0,87	0,98	0,00	0,41	0,03	0,17	0,50	0,88

5.2 Kallioperän ruhjeisuus

Testikentän eräiden kalliopisteiden korkeuden muutosten riippuvuus lämpötilasta johti päätelmään, että kallio pisteen kohdalla ei olisikaan yhtenäinen. Kallioperän ruhjeisuuden selvittämiseksi koko vaaitustestikenttä tutkittiin Ramac/GPR maatutkalla 2.4.2003 käyttäen 500 Mhz taajuutta. Kuvaa ruhjeista saatiin aina 8 metrin syvyyteen asti. Testikentän kriittisin kiintopiste M52 näyttää maan pinnalta katsoen olevan tasaisessa, ehjässä silokalliassa, mutta samasta kalliosta otettu tutkakuva kahdeksan metriin syvyyteen asti kertoo aivan jotain muuta (kuva 10).

Ruhjeita esiintyy 1, 3, 4, ja 8 metrin syvyydessä. Piste M52 näyttää olevan kuvan 10 mukaan kahden maljamaisen kallion kappaleen keskellä, joiden syvyydet ovat 4 metriä ja 8 metriä M52 kohdalla. Kuvan 10 perusteella voisi päätellä,

että kyseessä saattaa olla itä-länsi suuntaiset ruhjeet, joka yhdensuuntaisina kerroksina viettävät alaspäin pohjoista kohti. Kiintopisteet M51 ja M53 ovat juuri tämän 4 metriä syvän ruhjeen ulkopuolella, mutta jäävät 8 metrin syvyisen ruhjeen sisäpuolelle. Muita samanlaisia, ruhjeiden erottamia kallion kappaleita ei testikentän kiintopisteiden joukosta löytynyt, mutta selviä ruhjeita kylläkin pisteiden M22:n, M2:n, M4:n, M51:n, M53:n ja M5:n alapuolelta.



Kuva 10. Maatutkakuva pisteen M51, M52 ja M53 kohdalta. Kuva on luotu Ground Vision ohjelmalla.

6 Yhteenveto

Metsähovin vaaitustestikenttä on vuosina 2000–2002 tarkkavaaittu kuusi kertaa ja tulosten mukaan eräiden kalliokiintopistevälien korkeuserot muuttuivat eri mittausjaksojen välillä mittaustarkkuutta enemmän. Yhden kalliopisteen suhteellinen korkeuden muutos oli 3 mm ja muutamia muiden $> 0,5$ mm. Nämä korkeuden muutokset korreloivat kallion arvioidun lämpötilan ja pinnalle näkymättömän kallion rikkonaisuuden kanssa, mutta lämpötilasta riippuvuuteen on suhtauduttava kriittisesti, koska esimerkiksi sademäärän vaikutusta ei ole tutkittu.

Metsähovin testikentän eniten liikkuvan kalliopisteen M52 ympärille perustetaan lisäksi kiintopisteitä kalliioon ja kalliioon asennetaan lämpötila-antureita. Näiden avulla voidaan tutkia, kuinka luotettavia ilman keskilämpötilan perusteella tehdyt korjaukset ovat yksittäisen kalliopisteen korkeuden määrittämiseen. Lisäksi selvitetään sademäärän vaikutusta pisteliikuntoihin. Metsähovin testikentällä jatketaan maatutkamittauksia pisteen M52 ympäristössä ja tihennetään testikentän kallioperän lämpötilamittauksia. Samoin suoritetaan Eestikylän testikentän maatutka- ja kallioperän lämpötilamittaukset sekä jatketaan Metsähovin testikentän tarkkavaaituksia kaksi kertaa vuodessa ja tihennetään välin M4–M5 tarkkavaaituksia vuoden 2003 aikana.

Kiitokset. Tekijät kiittävät Mika Pirttivaaraa ja Tero Hokkasta Teknillisen korkeakoulun Materiaali- ja kalliotekniikan osastolta testikentän maatumittauksen suorittamisesta ja tulosten käsittelyssä avustamisesta.

Lähdeluettelo

Heikkinen, M. (1978). On the tide-generating forces. Suomen Geodeettisen laitoksen julkaisu n:o 85.

Hytönen, E. (1967). Measuring of the refraction in the Second Levelling of Finland. Suomen Geodeettisen laitoksen julkaisu n:o 63.

Kukkamäki, T.J. and P. Lehmuskoski (1984). Influence of the earth magnetic field on Zeiss Ni002 levels. Suomen Geodeettisen laitoksen tiedonantoja n:o 84:1.

Lehmuskoski, P. (1996). Active fault line search in Southern and Central Finland with precise levellings. Suomen Geodeettisen laitoksen tiedonantoja n:o 96:5.

Takalo, M. (1985). Horizontal-vertical laser rod comparator. Suomen Geodeettisen laitoksen tiedonantoja n:o 85:2.

Takalo, M. (1999). Verification of automated calibration of precise levelling rods in Finland. Suomen Geodeettisen laitoksen tiedonantoja n:o 99:7.

Takalo, M. and P. Rouhiainen (2002). On system calibration of digital levels. Proceedings of the XIV general meeting of the Nordic Geodetic Commission (ed. M. Poutanen and H. Suurmäki), s. 278–283.

Takalo, M., P. Rouhiainen, P. Lehmuskoski and V. Saaranen (2001). On calibration of Zeiss DiNi12. FIG working week 2001, May 6–11, Seoul, Korea. Proceedings.

Väisälä, Y. (1967). Experiences sur la Base D'essai Interferentielle A Turku-Tuorla. Annales Academiae Scientiarum Fennicae. Series A VI Physica 248. Suomalainen Tiedekatemia Helsinki 1967.