

Maanmittaus 79:1-2 (2004)

Saapunut 30.8.2004

Hyväksytty 24.9.2004

Geodeettisen laitoksen GPS-mittauksista Etelämantereella vuosina 2003-2004

Hannu Koivula ja Joel Ahola

Geodeettinen laitos, Geodesian ja geodynamiikan osasto

PL 15 (Geodeetinrinne 2), 02431 Masala

hannu.koivula@fgi.fi, joel.ahola@fgi.fi

Tiivistelmä. Geodeettinen laitos (GL) on osallistunut Suomen Etelämannertutkimusohjelmaan vuodesta 1989 alkaen. Tällä hetkellä GL tutkii maankuoren liikkeitä Kuningatar Maudin maalla. Tätä varten GL rakensi vuonna 2003 Suomen Etelämannerasemalle, Aboalle, GPS-aseman aiemmin rakennetun painovoimalaboratorion yhteyteen.

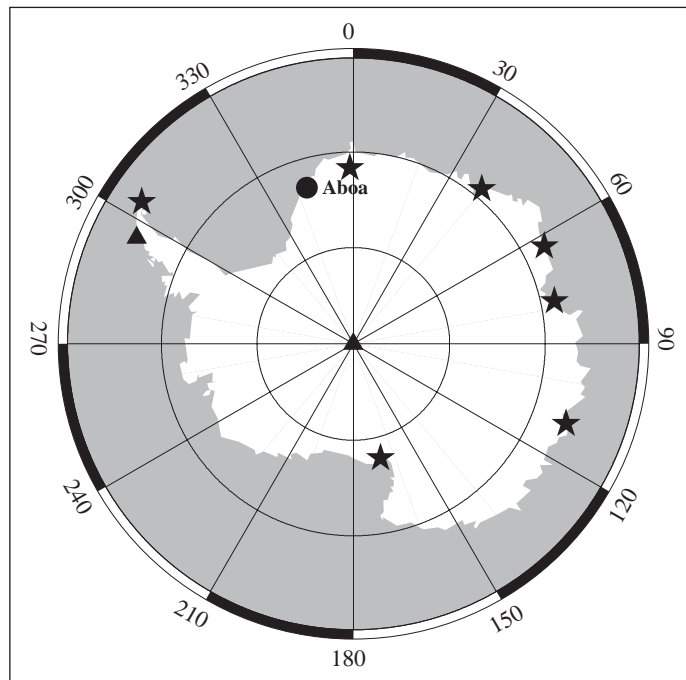
Nykyiset ja muinaiset jäämassat aiheuttavat muodonmuutoksia maankuoressa. Nykyisten jäämassojen maankuoreen aiheuttaman muodonmuutoksen sekä muinaisten jäämassojen massakompensaation hitaan muutoksen yhteisvaikutuksen saamme selville painovoimamittausten avulla. GPS-aikasarjoissa havaitsemme vain maankuoren nykyisen muodonmuutoksen. Kun yhdistämme GPS- ja painovoima-aikasarjat voimme teoriassa erotella nykyisten ja muinaisten jäämassojen aiheuttaman muutoksen toisistaan. Tulokset tulevat osaltaan parantamaan jääkauden aikaisten jäämäärien vaihteluiden ajoittamista.

Tässä artikkelissa esitellään GPS-aseman rakentaminen ja asemalta saadut ensimmäiset tulokset. Vuoden aikasarjan mukaan absoluuttinen maankohoaminen Aboalla on 2,9 mm/a. Dataa tarvitaan kuitenkin vielä useammalta vuodelta ennen kuin voimme vetää lopullisia johtopäätöksiä liikkeiden suuruudesta. Esittelemme myös painovoimamittauksiin liittyvät GPS:llä suoritettuja jäätikkömallinnukset. Jäätikön liike- ja lumenkertymätutkimuksien mukaan jäätikön virtausnopeus oli tutkimusalueella maksimissaan 5 m/a. Vuotuinen lumenkertymä oli jäätiköllä noin 0,6 m, kun Basenin rinteellä se oli 1,2 m. Osoitimme RTK GPS:llä, että vaikka uutta lunta kertyy paljon, ei lumimassan topografiassa tapahdu suuria muutoksia. Uusi lumi pakkaa vanhan lumen tiiviimmäksi säilyttäen alueen massatasapainon. Lisäksi kerromme Etelämantereen laajuisesta SCAR-mittauskampaan ja sekä muista pienemmistä GPS-mittauksista, joita GL teki vuosien 2003-2004 aikana Etelämantereella.

Avainsanat: Etelämannertutkimus, GPS, painovoima, maankuoren liikkeet, deformaatiotutkimus, elastinen muodonmuutos, viskoelastinen muodonmuutos, jääkausi.

1 Johdanto

Geodeettinen laitos (GL) on osallistunut Suomen Etelämannertutkimusohjelmaan (FINNARP – Finnish Antarctic Research Program) vuodesta 1989 lähtien. GL on ollut mukana FINNARP 89, 91, 93, 2000, 2002 ja 2003 retkikunnissa. Tutkimuksia on tehty ja tehdään pääasiassa Aboalla, joka on Suomen tutkimusasema Etelämantereella. Aboa ($73^{\circ}03' S$, $13^{\circ}24' W$) sijaitsee läntisellä Kuningatar Maudin maalla Vestfjellan vuoristossa n. 130 km sisämaahan päin Weddellin mereltä, laattajään reunalta (Kuva 1). Asema on rakennettu $3 \times 6 \text{ km}^2$ kokoiselle Basennunatakille, vuorelle, joka nousee n. 300 m ympäröivää, kilometrin paksuista jäätikköä korkeammalle. Aivan aseman naapurissa vain muutaman sadan metrin päässä sijaitsee ruotsalaisten Wasa-tutkimusasema. Aboa ja Wasa muodostavat yhdessä Nordenskiöldin tukikohdan (Kuva 2). Seuraavaksi lähin asema on eteläafrikkalaisten Sanae IV 390 km päässä. Aboalla ovat tutkimuksiaan tehneet mm. geologit, jää- ja lumi- ja ilmakehätutkijat. Geodeettisen laitoksen tutkimuksiin on kuulunut suhteellisia ja absoluuttisia painovoiman määrittämiä sekä GPS-mittauksia, joilla on mm. luotu Aboan ympäristöön kiintopisteverkko (Jokela ym. 1993).



Kuva 1. Suomen Etelämannertutkimusasema Aboa ($73^{\circ}03' S$, $13^{\circ}24' W$) sijaitsee läntisellä Kuningatar Maudin maalla (musta ympyrä). Etelämantereella on myös IGS-verkkoon (International GPS Service) kuuluvia (tähdet) ja SOPAC-verkkoon (The Scripps Orbit and Permanent Array Center) kuuluvia (kolmiot) pysyviä GPS-asemia.



Kuva 2. Nordenskiöldin tukikohta Basen-nunatakin etelärinteellä. Etualalla on Suomen Aboa-aseman rakennuksia. Taustalla näkyvät tummemmat rakennukset kuuluvat Ruotsin Wasa-asemalle. Pysyvä GPS-asema ja painovoimakontti ovat kuvan ulkopuolella vasemmalla (etelässä) noin 100 metrin päässä. (Kuva: J. Ahola/FINNARP2003)

Suomalaisille maankohoaminen on tuttu käsite. Nouseehan maa Suomessa vielä 10 000 vuotta sitten päättyneen jääkauden jälkeen 2-8 mm vuodessa. Geodeettinen laitos on tutkinut Suomessa maankohoamista mm. toistettujen tarkka-vaaitusten, suhteellisten ja absoluuttisten painovoimahavaintojen, mareografi-aikasarjojen ja viime aikoina myös pysyvien GPS-asemien aikasarjojen avulla (Mäkinen ym. 2003).

Maankuoren nykyliikkeiden ja painovoiman ajallisten vaihteluiden tutkiminen on geodynamiikan perustutkimusta, joka auttaa ymmärtämään jääkauden maankuoreen aiheuttamia muutoksia. Etelämantereella jääkausi jatkuu edelleen ja siellä voidaan tutkia myös nykyisten jäämassojen ja niiden vaihteluiden vaikutuksia maankuoreen. Eräs tapa havaita muutoksia maankuoreessa ovat toistetut absoluuttiset painovoimamittaukset. Painovoiman arvon vaihteluun Etelämantereella on kolme pääsyytä:

1. Jään määrän nykyisten vaihteluiden aiheuttama maankuoren muodonmuutos. Maan kuori reagoi massamuutoksiin elastisesti ilman aikaviivettä joko painuen kasaan tai palaten tasapainotilaan.
2. Vanhojen jäämassojen aiheuttamat hitaat muodonmuutokset. Maa reagoi vanhojen jääkausien jäämäärien muutoksiin viskoelastisesti. Tällainen deformaatio syntyy ja palautuu erittäin hitaasti tuhansien vuosien aikana vaipan massavirtausten täyttäessä maankohoamisen aiheuttamaa massavajasta.
3. Paikalliset massamuutokset havaintopisteen läheisyydessä. Jäämäärän paikalliset vaihtelut vaikuttavat havaittuun painovoimaan. Jos tämä massa

muuttuu, se vaikuttaa myös gravimetrian havaitsemaan suoraan vetovoimaan. Tämän johdosta paikallisten jääolosuhteiden mallintaminen painovoimahaavaintopisteen ympärillä on äärimmäisen tärkeää.

Painovoimamittausten avulla voimme havaita sekä pystysuoran sijainnin muutoksen että siihen liittyvän massamuutoksen yhteisvaikutuksen. GPS-aseman pitkien aikasarjojen avulla voimme seurata maan kuoren nykyisiä liikkeitä jopa mm-tarkkuudella. Yhdistämällä GPS- ja absoluuttipainovoimahaavaintojen aikasarjat voimme teoriassa erotella elastisen ja viskoelastisen muodonmuutoksen toisistaan, koska ne vaikuttavat eri tavoin painovoimaan suhteessa aseman korkeuden muutoksiin, jonka saamme GPS:llä.

Geodeettinen laitos on aloittanut Etelämantereella tutkimusohjelman, jossa tehdään usealla Kuningatar Maudin maalla sijaitsevalla tutkimusasemalla toistettuja absoluuttipainovoimahaavaintoja (Mäkinen ym. 2004). Ohjelman osana Aboalle rakennettiin vuonna 2003 pysyvä GPS-asema, jonka aikasarjat antavat tulevaisuudessa arvokasta tietoa maankuoren liikkeistä (Koivula ja Mäkinen 2003). Pitkän aikavälin tavoitteena on yhdistää painovoima- ja GPS-havainnot ja saada uutta tietoa maankuoren liikkeistä ja massavirtauksista Kuningatar Maudin maalla.

Tässä artikkelissa keskitytään Geodeettisen laitoksen FINNARP2002 ja FINNARP2003 retkikunnissa tehtyihin GPS-mittauksiin ja niiden tuloksiin. Luvussa 2 esitellään pysyvän GPS-aseman rakentamista ja ensimmäisen toimintavuoden tuottaman datan tuloksia. Luvussa 3 kerrotaan Etelämantereen laajuisesta SCAR:n (Scientific Committee on Antarctic Research) järjestämästä vuotuisesta GPS-mittauskampanjasta, johon GL on jo usean vuoden ajan osallistunut. Luvussa 4 esitellään lumiprofiilien mittauksia. Ensin esitellään jo vuosia sitten rakennettua 5,5 km pitkän keppilinjan uudelleen rakentaminen ja siitä saadut jään liikkeitä, lumenkertymää ja jään massatasapainoa kuvaavat tulokset. Luvussa 4 esitellään myös moottorikelkkaan kiinnitettävällä, liikkuvalla RTK-mittausalustalla tehdyn jäätikön pintamallinnuksen tuloksia. Tämän mittauksen tarkoituksena on mallintaa jään määrä painovoimapilarin ympäristössä painovoimamittausten aikana, jotta jään ja lumen massojen muutosten vaikutus voidaan huomioida painovoimamittaus tuloksissa. Luvussa 5 kerrotaan Basen-nunatakin kiintopisteverkon uudelleenmittauksesta, ruotsalaisen SVEA-aseman (kenttäasema noin 190 km etelään WASA-asemalta) lähelle jätetyn antennin käyttämisestä mittauksissa sekä Aboan ympäristön kartoituksesta. Luvussa 6 esitellään GL:n tulevaisuudennäkymiä Etelämannertutkimuksessa.

2 Aboan pysyvä GPS-asema ja ensimmäiset tulokset

Miehittämättömän GPS-aseman rakentaminen Etelämantereelle on haasteellinen tehtävä. Suurin osa mantereella olevista GPS-asemista on rakennettu ympäri vuoden toimivien tutkimusasemien yhteyteen. Useat tutkimusryhmät ovat vuosien varrella jättäneet vastaanottimiaan mantereelle vain todetakseen seuraavalla kent-

täkaudella niiden syystä tai toisesta sammuneen. Miehitettömän GPS-aseman tulisi viedä mahdollisimman vähän virtaa ja toimia luotettavasti ilman huoltoa erittäin ankarissa ilmasto-olosuhteissa. Touko-heinäkuussa aurinko ei nouse 2,5 kuukauteen, joten aurinkokennotkaan eivät juuri lataa akkuja. Tuuligeneraattoreiden kestävyys lumimyrskyissä ja kovilla pakkasilla on myös haaste sinänsä.

2.1 GPS-aseman rakentaminen

Aboan GPS-aseman (Kuva 3) rakentamisessa vastuujako oli selkeä. Merentutkimuslaitoksen FINNARP-logistiikka vastasi virransaannista ja Geodeettinen laitos GPS-laitteen hankinnasta ja asentamisesta. GPS-asema rakennettiin FINNARP2002 retkikunnan yhteydessä.

GPS-antennin alustaksi oli kolme vaihtoehtoa. Matala teräsristikkomasto, valettu pilari tai suora asennus kalliolle adapterin avulla. Viimeinen hylättiin koska emme voineet olla varmoja, että paikka johon antenni sijoitetaan olisi vuoden ympäri lumesta vapaa. Lisäksi lumi saattaisi pakkautua antennin sivulle. Päädyimme mastoon, koska sen asentaminen on nopeaa ja pystytään tekemään huonossakin säässä. Masto ankkuroitiin suoraan basalttiseen peruskallioon kuu-della kierretangolla.



Kuva 3. Aboan pysyvä GPS-asema Basen-nunatakin rinteessä. GPS-vastaanotin on sijoitettu takana näkyvään konttiin, jonka sisällä olevalla pilarilla suoritetaan painovoimamittauksia. Kenttäkausien ajaksi kontin katolle asennetaan RTK-tukiaseman lähetyksiantenni. (Kuva: J. Ahola/FINNARP2003)

Antenni (ASH701945C_M) on Ashtechin vaimennusrenkailla varustettu malli, jonka päällä on Ashtechin lumikupu. Vastaanottimeksi valitsimme Javad EURO80 GDA-kortin, joka suljettiin metallilaatikkoon. Valinnan perusteina oli vastaanottimen matala virrankulutus (1,8-2,4 W) ja mahdollisuus tallentaa havainnot suoraan GPS-kortissa olevalle CompactFlash muistikortille. Näin emme tarvitse erillistä virtaa vievää muistililäitettä tai tietokonetta datan tallentamiseen. Sekä vastaanottimen että muistikortin toiminta-alue alkaa -40°C :sta. Vastaanottimen oletettiin tuottavan sen verran lämpöä, että lämpötila laatikossa olisi parikymmentä astetta ympäristöään korkeampi. Kun Aboalla ei ole rekisteröity -50°C alhaisempia lämpötiloja, uskoimme näiden laitteiden olevan käyttötarkoitukseemme sopivia.

Virtansa vastaanotin saa Aboan päärakennuksen taakse rakennetusta 1 075 Ah akustosta, jota ladataan kenttäkaudella dieselgeneraattoreilla ja kenttäkauden ulkopuolella tuuligeneraattoreilla ja aurinkopaneeleilla. Virta jaetaan ilmatieteen laitoksen automaattisen sääaseman ja hiukkastutkimuslaitteiston kanssa.

Kenttäkaudella vastaanottimeen voidaan liittää Satellite-3As/d radiomodeemi, jolloin se tarjoaa RTK-korjausta 430,15 MHz taajuudella. Tästä hyötyvät kaikki FINNARP ja SWEDARP (Swedish Antarctic Research Programme) retkikuntiin osallistuvat tutkijat sekä logistikot, jotka käyttävät reaaliaikaista kinemaattista GPS-paikanmäärittystä.

GPS-asema saatiin valmiiksi vuoden 2003 alkupuolella. Ensimmäiset havainnot kerättiin 1.2.2003 paikallisten akkujen voimalla. 6.2.2003 GPS-asema liitettiin Aboan 24 V talvisähköjärjestelmään. Vastaanottimeen ei saada yhteyttä vuoden aikana ja vasta seuraava retkikunta voi raportoida onko vastaanotin toiminnut koko vuoden (Koivula ja Mäkinen 2003).

2.2 Ensimmäiset tulokset

GPS-aseman ensimmäinen toimintavuosi onnistui hyvin: yhtään päivää dataa ei menetetty. Ensimmäiset datat saatiin Suomeen ruotsalaisten SWEDARP retkikunnan palattua joulukuun 2003 Ruotsiin. GPS-data on laskettu Etelä-Afrikan Sanae IV asemalla olevan VESL-nimisen GPS-aseman suhteen, jossa GL on aloittanut myös aboluuttipainovoimahavaintojen teon. Vektorin pituus on 390 km. Laskennassa on käytetty Bernese 4.2 -ohjelmistoa ja IGS:n (International GPS Service) tarkkoja ratoja. Kokonaislukutuntemattomat on ratkaistu QIF-metodilla ja troposfäärizeniittikorjaus on ratkaistu kummallekin asemalle.

Kuvassa 4 on esitetty laskennan tulokset. Yhdellä pisteellä on kuvattu yhden päivän koordinaattiratkaisua. Etenkin asemien välisessä korkeuserossa on selkeitä jaksoja, joiden aikaiset havainnot ovat muista poikkeavia. Ilmiö on tuttu Suomen pysyvän GPS-verkon laskennasta ja on yhdistetty antennin päälle talven aikana kertyneeseen lumeen. Aikasarjoihin on sovitettu suora iteratiivisella menetelmällä. Kullakin iteraatiokierroksella hylätään havainnot, jotka poikkeavat yli 14 mm suorasta (kokeellinen arvo FinnRef verkon laskennasta, ks. Mäkinen ym. 2003). Sovitus tehdään uudestaan ilman edellisellä kierroksella hylättyjä ha-

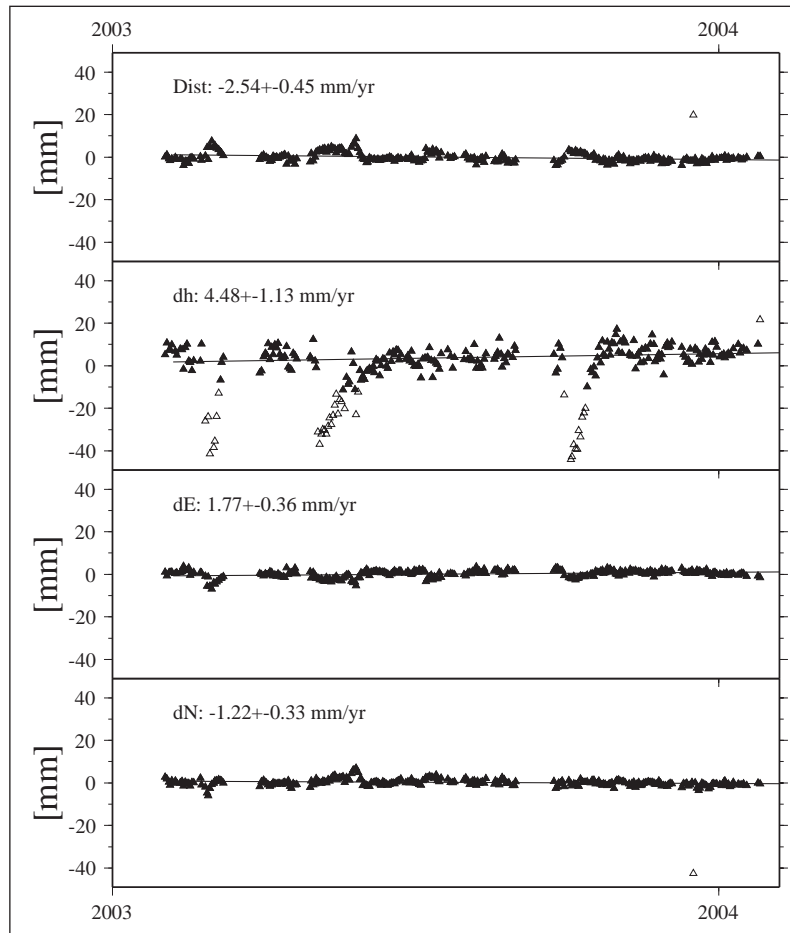
vainoja ja jatketaan kunnes suoran paikka ei enää muutu. Kuvasta 4 nähdään että VESL-ABOA -vektorin komponenttien vuotuiset muutokset vuoden GPS-datan perusteella ovat $-1,22 \pm 0,33$ mm/a pohjoissuunnassa, $+1,77 \pm 0,36$ mm/a itäsuunnassa ja $+4,48 \pm 1,13$ mm/a korkeudessa. JPL (Jet Propulsion Laboratory) antaa kotisivuillaan VESL-aseman korkeuden muutokseksi $-(1.59 \pm 0,23)$ mm/a (JPL 2004). Jos tämä otetaan lähtökohdaksi, saamme vuoden GPS-aikasarjasta Aboan absoluuttiseksi maankohoamiseksi n. 2,9 mm/a. Kokemuksesta tiedämme, että saadaksemme mm-tarkkuudella luotettavia korkeudenmäärytyksiä tarvitsemme ainakin 3-4 vuoden aikasarjan. Voimme kuitenkin verrata tulosta erilaisista malleista saatuihin arvoihin. James ja Ivins (1998) vertasivat ICE-3G, ICE-4G ja D91 jäämallien vaikutuksia ja ennustivat, että riippuen käytetystä mallista maankuoren pitäisi kohota Aboalla $-0,1 \dots +6,6$ mm/a. Ensimmäisen vuoden tuloksemme osuu tähän vaihteluväliin, mutta ei vielä riitä tarkkuutensa puolesta siihen, että voisimme väittää jonkin mallin olevan toista paremman.

3 SCAR GPS-kampanja

Eri geotieteiden tutkimuksessa tarvitaan riittävällä tiheydellä mitattuja geodeettisia koordinaatteja hyvin määritellyssä koordinaatistossa erilaisten ongelmien ratkaisemiseksi. Vuonna 1994 Roomassa pidetyssä XXIII SCAR (Scientific Committee on Antarctic Research) kokouksessa geodesian ja paikkatiedon työryhmä (SCAR WG-GGI) päätti järjestää vuosittain tammi-helmikuussa uusittavan Etelämantereen laajuisen GPS-kampanjan vastatakseen koordinaattien tarpeeseen. SCAR-kampanjoiden tavoitteet, jotka hyödynsivät myös työryhmän GIANT (Geodetic Infrastructure for Antarctica) -projektia, olivat:

1. Mahdollisimman tarkan ITRF-järjestelmässä (International Terrestrial Reference Frame) mitatun kolmiulotteisen geodeettisen referenssiverkon luominen Etelämantereele,
2. Etelämantereen mannerlaatan liikevektoreiden määrittäminen,
3. Jäämassojen määrän ja valtameren kuormituksen aiheuttaman maankuoren korkeusvaihteluiden tutkiminen ja
4. Geodeettisen linkin luominen Etelämantereen mareografien ja ITRF:n välille.

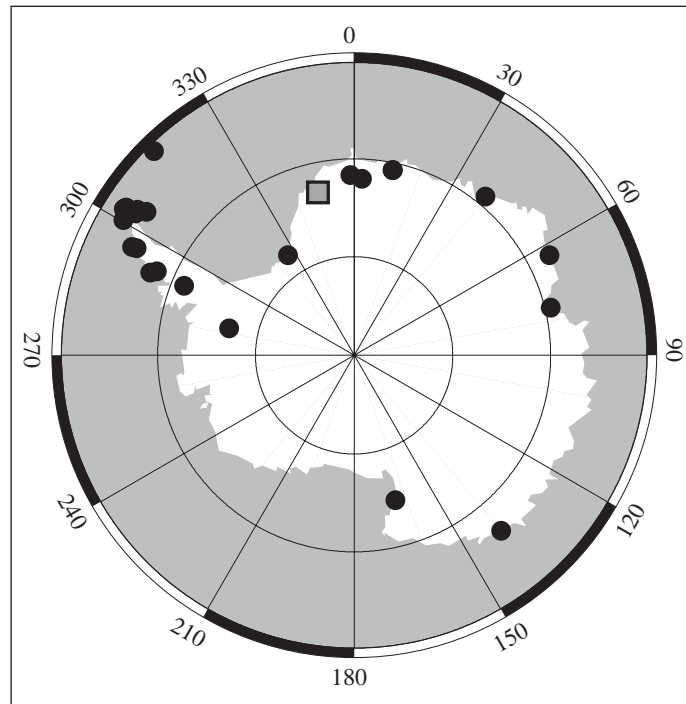
Kuvassa 5 on esitetty SCAR-kampanjoissa mukana olleet pisteet. Ruotsalaisten WASA-aseman läheisyydessä on WASA-niminen piste, joka on ollut mukana SCAR kampanjoissa vuosina 1992, 1997, 2000, 2001, 2002, 2003 ja 2004. Tukholman Kuninkaallinen teknillinen korkeakoulu mittasi kolme ensimmäistä kampanjaa ja GL neljä viimeisintä. Vuoden 2002 kenttämittauksista vastasi Merentutkimuslaitoksen FINNARP-logistiikka.



Kuva 4. Ensimmäisen vuoden GPS-aikasarja VESL ja ABOA asemien välillä. Yksi kolmio kuvaa yhden vuorokauden koordinaattiratkaisun poikkeamaa vuoden keskiarvosta. Avoimet kolmiot ovat suoran sovituksen yhteydessä hyläytyjä havaintoja. Dist on asemien välinen etäisyys, dh on korkeusero, dE on itä-länsisuuntainen ja dN pohjois-eteläsuuntainen komponentti. Katkot aikasarjoissa johtuvat siitä, että VESL-aseman dataa ei ollut kyseisiltä päiviltä käytettävissä.

4 Lumiprofilien mittaukset

Jäätiköiden liikkeitä ja lumen kertymää on mitattu Aboalla useaan otteeseen. Pääasiallisesti asiasta ovat olleet kiinnostuneita lumi- ja jäätikkötutkijat sekä geologit. Geodeettien kannalta jäätikön liikkeet, tiheydet ja massamuutokset ovat mielenkiintoisia, koska ne vaikuttavat havaittuun painovoimaan ja maankuoren muodonmuutoksiin.



Kuva 5. SCAR-kampanjoissa mukana olleet asemat. WASA on merkitty neliöllä.

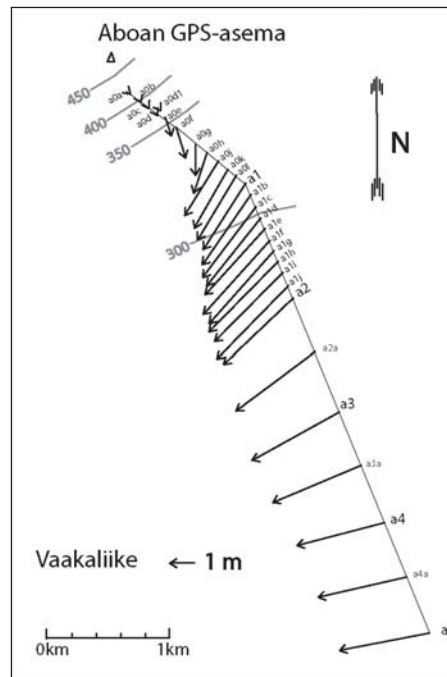
4.1 Keppilinja jäätikön liikkeiden ja lumenkertymän tutkimiseksi

Kaudella 1997/1998 Geologian tutkimuskeskus (GTK) rakensi ja mittasi n. 40 km pitkän keppilinjan Basenilta Fossilryggenille (Ruotoistenmäki ja Lehtimäki 1999). FINNARP1999-retkikunnan aikana lumitutkijat rakensivat Aboalta lähtevän 5,5 km pitkän keppilinjan, jolla oli kolme yhteistä keppiä GTK:n linjan kanssa (Sinisalo ym. 2003). FINNARP2000 retkikunnan aikana Geodeettinen laitos huolsi ja mittasi 5,5 km linjan uudestaan.

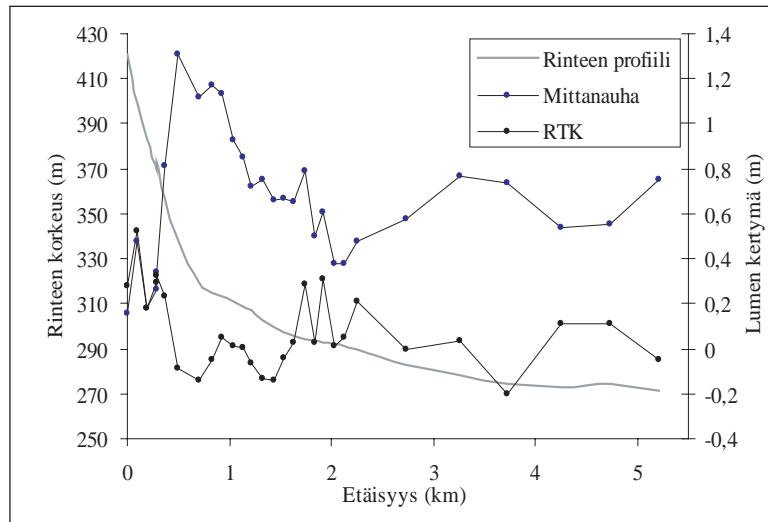
FINNARP2002 retkikunnan yhteydessä GL totesi koko 5,5 km linjan yhtä keppiä lukuun ottamatta kadonneeksi ja rakensi sen kokonaan uudestaan. Uusi linja käsittää 29 keppiä (Kuva 6), joiden koordinaatit mitattiin uutta GPS-tuki-asemaa hyväksikäyttäen RTK:lla. Samassa yhteydessä mitattiin keppien pituudet myös mittanauhalla, jotta saadaan käsitys vuotuisesta lumenkertymästä. Linjalla suoritettiin myös lumentiheysmittauksia yhteistyössä lumitutkijoiden kanssa. Lumentiheysiä mitattiin joko kairaamalla 0,5 m syvyyteen tai kaivamalla lumi-kuoppia, joista otettiin näytteitä 10 cm välein 1 m syvyyteen asti. GL huolsi ja mittasi tämän linjan FINNARP2003 retkikunnan yhteydessä.

Esitämme tässä kahden viimeisimmän mittauksen tulokset. Keppilinjan koordinaatit ja keppien pituudet mitattiin 4.2.2003 ja 14.1.2004. Suurimmat jäätikön virtausnopeudet linjalla ovat noin 5 m vuodessa (Kuva 6). Kuvassa 7 on esi-

tetty keppien pituudenmittauksista havaittu lumenkertymä sekä RTK:lla mitattu jäänpinnan korkeusvaihtelu kepin kohdalla. Kuvassa esitetään myös rinteän profiili. Keppimittausten mukaan vuosittainen lumenkertymä on ollut voimakkainta Basenin rinteellä, jossa se on ollut jopa yli 1,2 m. Jäätiköllä vuotuinen kertymä on ollut noin 0,6 m. Lumen kerääntymiseen ja paikallisiin vaihteluihin vaikuttavat pinnan muodot ja paikalliset tuulet. Tasaisilla alueilla lumen kulkeutuminen on voimakasta ja kerääntyminen vähäistä. Nunatakien kohdalla lunta kertyy tuulen voimakkuudesta riippuen joko suojan tai tuulen puolelle. Mikäli tuuli jaksaa nostattaa lumen nunatakin yli se kertyy suojan puolelle, muussa tapauksessa se kertyy tuulen puolelle. RTK-mittauksista saadusta topografiasta näemme, että vaikka uutta lunta ja jäätä kertyy paljon ei massatasapainossa tapahdu suuria muutoksia. Vanha lumi pakkautuu tiiviimmäksi uuden lumen painosta muuttuen viimein 50-100 m syvyydessä jääksi.



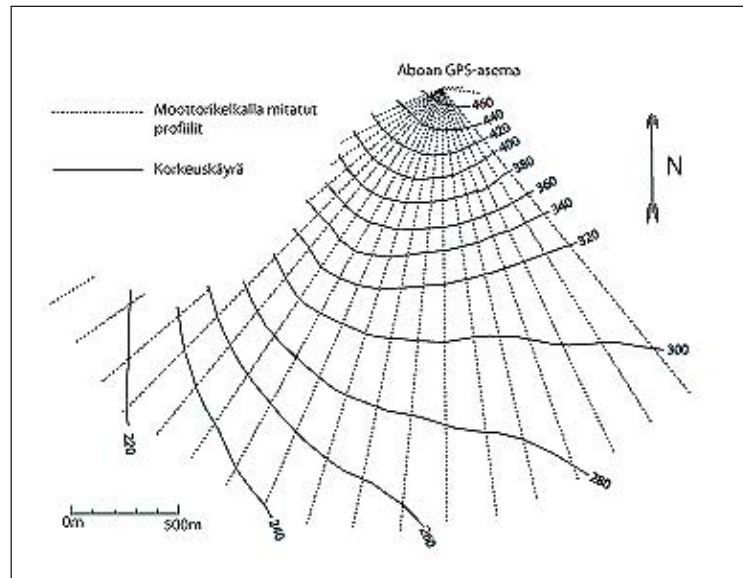
Kuva 6. Keppilinjalla kahden mittauksen vuotuinen maksimiliike on noin 5 m ja suuntautuu rinnettä alas ja jäätiköllä jäävirtojen mukana merelle päin.



Kuva 7. Keppilinjalla tehtyjen mittausten tulokset ja linjan profiili. Profiili on merkitty paksulla harmaalla viivalla alkaen vasemmalta painovoimakontin lähetyviltä. Rinne laskee kahden kilometrin matkalla yli 120 m. Katkoviivalla on kuvattu kahtena vuonna mittanauhalla mitaten saatu lumen kertymä kunkin kepin kohdalla. Yhtenäisellä viivalla on esitetty vastaava korkeuden vaihtelu RTK GPS:llä mitattuna.



Kuva 8. Basenin rinteän profiileja mitattiin RTK GPS:llä. Kuvassa olevaa kelkkaa hinattiin moottorikelkalla mitaten koordinaatteja 1 m välein. (Kuva: J. Ahola/FINNARP2003)



Kuva 9. Basenin rinteelle mitatut profiilit ja niiden avulla määritetyt korkeuskäyrät (m).

4.2 Painovoimapilarin ympäristön lumen maastomallinnus

Massan muutokset painovoimapisteen ympäristössä vaikuttavat havaittuun painovoimaan. Näitä aiheuttavat mm. vuosittain vaihtuvat lumiolo. Näiden mallintamiseksi painovoimakontin lähiympäristöön mitattiin noin 2 000 pistettä käsittävä maastomalli.

Painovoimakontin lähiympäristön lumenvaihteluiden lisäksi painovoimaan vaikuttavat myös Aboan kotivuoren Basenin rinteiden lumenvaihtelut, jotka voivat edellisten retkikuntien kokemusten mukaan olla useita metrejä. Vuorenrinteen lumiolojen mallinnukseen kehitettiin rekeen asennettava RTK-tekniikkaan perustuva automaattinen GPS-mittauslaite (Kuva 8). Laitetta hinataan hitaasti moottorikelkalla ja sijainti tallennetaan metrin välein. GL mittasi 21 profiilia Basenin rinteeseen painovoimapisteltä säteittäisesti alas jäätikölle (Kuva 9). Profiilien pituudet vaihtelivat 100 ja 2 000 m välillä riippuen railo- ja kallioalueiden sijainnista. Profiilien yhteispituus on noin 35 km. GPS-tekniikan korkeustarkkuus kyseisessä sovelluksessa on noin 2-3 cm, mutta ulkoiset seikat heikentävät tarkkuuden noin 10 cm:iin. Suurin virhelähde on lumen pinnan epätasaisuus. Reen jalas ei voi seurata lumen pinnan pienmuotoja tarkasti. Lisäksi GPS-antenni ei ole pystyasennossa rinnettä ajettaessa. Kaikki profiilit ajettiin ylhäältä alaspäin tähdäten jäätikölle asennettuun tähystynnyriin. Näin linjoista saatiin mahdollisimman suorat. Ajonopeus vastasi kävelyvauhtia, jotta GPS-laite pystyi tekemään riittävän tiheät rekisteröinnit. Peräkkäisten pisteiden väliseksi keskimääräiseksi etäisyydeksi tuli 1,1 m. Tämän ensimmäisen mittauksen tulokset on esitetty Kuvassa 9. Seuraavien

painovoimamittausten yhteydessä mittaukset uusitaan. Lumen massavaikutuksen arvioimiseksi lumesta otettiin tiheysnäytteitä kairaamalla metrin lumipilari ja mittaamalla sen ulkoiset mitat sekä paino. Näytteenottoaikat (18 kpl) sijaitsivat tasaisesti profiilien alueella.

5 Muita GPS-mittauksia

5.1 Basenin kiintopisteverkko

Basen-nunatakille Aboan ja Wasan ympäristöön on rakennettu joukko kiintopisteitä. Näille on julkaistu koordinaatit mm. julkaisussa Jokela ym. (1993). Lisäksi joukko ruotsalaisia ja suomalaisia tutkijoita on käyttänyt erilaisia lähtökoordinaatteja omissa mittauksissaan. GL tarjoaa vuodesta 2003 lähtien mahdollisuutta käyttää Aboan GPS-asemaa RTK-tukiasemana. Mittasimme kaikki alueelta löytämämme kiintopisteet uudelleen staattisella GPS:llä, jotta saimme niille koordinaatit samassa järjestelmässä kuin GPS-asema. Koordinaatit sidottiin WASA:n ITRF96-koordinaatteihin epookissa 1997.1 (Dietrich ym. 2001). Laskennan tulokset on esitetty Taulukossa 1. Nämä koordinaatit antavat mahdollisuuden käyttää jatkossa Aboan RTK-palvelua tai tukiaseman GPS-dattaa ja yhdistää tulokset vanhoihin mittauksiin, mikäli ne on sidottu näihin kiintopisteisiin.

5.2 Svean kiinteän GPS-antennin havainnot

Ruotsalaisten kenttäasema Svea sijaitsee Heimefrontfjellan vuoristossa 190 km Aboalta etelään. Svean viereisellä kukkulalla sijaitsee hollantilaisen Utrechtin yliopiston kaudella 1999/2000 perustama kiinteä GPS-antenni (Zwartz ja Helsen 2002). Hollantilaisten tarkoituksena oli kerätä asemalta pitkä GPS-aikasarja, mutta laitteet eivät toimineet kunnolla ja havaintoaineistoa on olemassa vain 12 päivää vuoden 2000 alusta. Lumitutkijoiden tehdessä tutkimuksiaan Svealla GL mittasi hollantilaisten paikalleen jättämällä antennilla 4.-10.1.2004. Mittauksia Svealla tullaan jatkamaan, mikäli sinne ei tulevaisuudessa rakenneta pysyvää GPS-asemaa

5.3 Aboan ja Wasan kartoitus

FINNARP-logistiikan toivomuksesta sekä Aboan että Wasan tutkimusasemat kartoitettiin. Kaikkien konttien paikat, putket, johdot ja kaapelit mitattiin RTK GPS:llä tammikuussa 2004, jotta niiden paikka ja keskinäinen sijainti ovat tiedossa esimerkiksi seuraavan kauden asennustöitä suunniteltaessa.

Taulukko 1. Basenilla sijaitsevien kiintopistepulttien koordinaatit. Wasa on kiinnitetty sen ITRF96-koordinaatteihin epookissa 1997.1 (Dietrich ym. 2001).

| Piste | Koordinaatit | | | Keskivirhe (mm) | | |
|--------|------------------|------------------|---------|-----------------|-----|-----|
| | Leveysaste | Pituusaste | h (m) | (S) | (W) | (h) |
| 900001 | 73°02'28,81537"S | 13°24'05,69716"W | 495,157 | 0,2 | 0,2 | 0,6 |
| 900032 | 73°02'37,59744"S | 13°24'23,98902"W | 467,352 | 0,8 | 0,4 | 1,9 |
| 910023 | 73°02'29,94509"S | 13°24'26,36215"W | 482,557 | 0,2 | 0,1 | 0,6 |
| 910024 | 73°02'22,87693"S | 13°24'32,74326"W | 490,790 | 0,2 | 0,2 | 0,6 |
| ABOA | 73°02'37,57989"S | 13°24'25,68634"W | 468,640 | 0,2 | 0,2 | 0,7 |
| BASEN | 73°02'05,42277"S | 13°25'14,51325"W | 601,911 | 0,3 | 0,3 | 1,0 |
| WASA | 73°02'34,22900"S | 13°24'50,52273"W | 466,396 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 2004A | 73°02'37,74256"S | 13°24'29,58398"W | 463,259 | 0,3 | 0,2 | 0,8 |
| 2004B | 73°02'36,84271"S | 13°24'25,32695"W | 469,475 | 0,3 | 0,2 | 0,9 |

6 Tulevaisuuden näkymiä

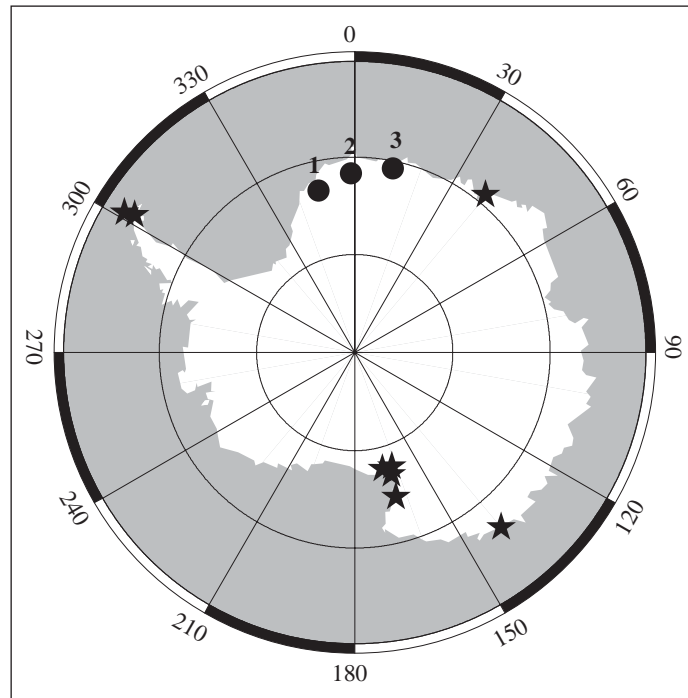
Etelämantereen jääkausien vaiheet ovat heikosti tunnettuja, koska niistä ei ole jäänyt maastoon merkkejä kuten Pohjoismaissa tai Kanadassa. Olemassaolevaa havaintoaineistoa on myös erittäin vähän.

Satelliittiohjelmat antavat enenevässä määrin informaatiota Etelämantereen nykyisistä jäämääristä ja niiden vaihteluista. Wingham ym. (1998) mallinsivat Etelämantereen korkeudenmuutoksia vuodesta 1992 vuoteen 1996 ERS-1 ja ERS-2 kaukokartoitus-satelliittien altimetritutkan avulla. Heidän mukaansa jäänpinnan korkeus laskee Etelämantereella keskimäärin $0,9 \pm 0,5$ cm vuodessa. Aboan alueelle he mittasivat jäämäärän kasvavan $4,4 \pm 1,1$ cm vuodessa. Tänä päivänä jäämassojen topografiaa mitataan ICESAT/GLAS-satelliitilla ja ensi vuodesta alkaen CRYOSAT:illa. Vuonna 2002 laukaistulla GRACE-painovoimasatelliitilla voidaan havaita jäämäärien muutoksen ja vaipan massavirtausten yhteisvaikutusta painovoimakenttään. Lisätietoa saadaan havaitsemalla suoraan kiinteän maan muodonmuutoksia GPS:llä ja absoluuttipainovoimamittauksilla.

GL tulee jatkamaan Aboan pysyvän GPS-aseman ylläpitoa ja laskee siitä aikasarjoja ainakin VESL:n aseman suhteen laajentaen laskentaa mahdollisuuksien mukaan koko Kuningatar Maudin maalle. Muutamien vuosien jälkeen meillä on riittävästi GPS-dataa, jotta voimme arvioida luotettavasti maankuoren nykyliikkeitä mm-tarkkuudella. Pitkäkään GPS-aikasarja ei pysty kertomaan, johtuuko esim. korkeuden muutos nykyisistä vai muinaisista jäämassojen määrien muutoksista. Tähän tarvitaan toistettuja absoluuttipainovoimamittauksia.

Toistettujen absoluuttipainovoimamittausten avulla saamme tietoa painovoiman muutoksista. Painovoimaan vaikuttaa sekä elastinen deformaatio, joka johtuu jääkuorman nykyisistä vaihteluista, että vanhoista jääkuorman vaihteluista johtu-

vat vaipan virtaukset. Koska elastinen deformaatio ja vaipan virtauksista johtuva deformaatio vaikuttavat eri tavoin painovoimaan suhteessa aseman korkeuden muutoksiin, voimme periaatteessa erottaa nämä kaksi toisistaan, kun yhdistämme painovoimatuloksiin GPS:stä saadun liikeinformaation.



Kuva 10. Geodeettinen laitos on suorittanut absoluuttisia painovoimamittauksia Aboan (1) lisäksi myös eteläafrikkalaisella Sanae IV:llä (2) ja venäläisellä Novolazarevskayalla (3). Kaikki muut Etelämantereella suoritetut absoluuttiset painovoimamittaukset on merkitty tähdellä (Mäkinen ym. 2004).

Etelämantereella absoluuttipainovoimamittauksia tehtäessä on syytä muistaa, että jäämäärän paikalliset vaihtelut vaikuttavat havaittuun painovoimaan. Tällaisten paikallisten efektien kontrolloimiseksi GL jatkaa jäätilanteen kartoittamista Aboan ympäristössä aina painovoimamittausten yhteydessä.

GL on mitannut absoluuttipainovoimaa Aboalla 1994, 2001 ja 2004. Viimeisen mittauksen yhteydessä mitattiin myös eteläafrikkalaisella Sanae IV -asemalla ja venäläisellä Novolazarevskaya-asemalla (Kuva 10) (Mäkinen ym. 2004). Näitä mittauksia pyritään jatkamaan yhteistyössä SANAPin (South African National Antarctic Program) ja AARI/AANIIn (Arktisen ja antarktisen tutkimuksen keskus, Pietari) kanssa. Tarkoituksena on jatkaa mittauksia siten, että saamme pitkiä aikasarjoja Kuningatar Maudin maalta. Ohjelmaamme pyritään hankkimaan muitakin yhteistyötahoja, joilla on tai jotka voivat perustaa pysyviä GPS-asemia tai

tehdä absoluuttipainovoimahavaintoja alueella.

Kun pystymme ratkaisemaan nykypäivän todellisen liikkeen Aboalla ja muilla Kuningatar Maudin maalla olevilla GPS-aseilla ja olemme saaneet absoluuttisen painovoimamittauksen aikasarjoja voimme pyrkiä erottelemaan elastisen ja viskoelastisen muodonmuutoksen alueella. Tulokset tulevat auttamaan omalta osaltaan Etelämantereen maankuoren liikkeiden aiheuttajien mallintamista. Tällä hetkellä avoimia kysymyksiä ovat mm. edellisen jääkauden maksimijankohdan jäämäärä ja sen sulamisen ajoitus sekä maan vaipan viskositeettiarvot. Mahdollisimman tarkat geodeettiset mittaukset maankuoren nykyisestä käyttäytymisestä tuottavat reunaehtoja, jotka voivat tulevaisuudessa parantaa jäämallien tarkkuutta.

Kiitokset. Kiitämme tutkija Eija Kärkästä Helsingin Yliopiston Fysikaalisten tieteiden laitoksen Geofysiikan osastolta arvokkaista lumitutkimukseen liittyvistä keskusteluista sekä erikoistutkija Jaakko Mäkistä GL:lta lukuisista hedelmällisistä tutkimukseen ja kenttämatojen suunnitteluun liittyvistä palavereista sekä kaikkia FINNARP 2002-2003 retkikuntiin osallistuneita pyyteettömästä avusta mittausten aikana. Kenttälögiistiikan hoiti Merentutkimuslaitoksen FINNARP-logistiikka molempien retkikuntien aikana.

Viiteluettelo

Dietrich, R., R. Dach, G. Engelhardt, J. Ihde, W. Korth, H.-J. Kutterer, K. Lindner, M. Mayer, F. Menge, H. Müller, C. Müller, W. Niemeier, J. Perlt, M. Pohl, H. Salbach, H.-W. Schenke, T. Schöne, G. Seeber, A. Veit and C. Völksen (2001). ITRF coordinates and plate velocities from repeated GPS campaigns in Antarctica – an analysis based on different individual solutions. *Journal of Geodesy*, 74, 11/12, 756-766.

James, T.E. and E.R. Ivins (1998). Predictions of Antarctic crustal motion driven by present-day icesheet evolution and by isostatic memory of the Last Glacial Maximum. *Journal of Geophysical Research*, 103 (B3), 4993–5017.

Jokela, J., M. Ollikainen, P. Rouhiainen and H. Virtanen (1993). The gravity and GPS survey in Western Queen Maud Land, Antarctica, 1989–1992. Reports of the Finnish Geodetic Institute. 93:6. 46 p.

JPL (2004). <http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/series.html> (26.8.2004).

Koivula, H. and J. Mäkinen (2003). Geodetic Activities at Finnish Antarctic Research Station Aboa. Presented at the Fifth International Antarctic Geodesy Symposium AGS'03, Lviv, Ukraina, September 15-17, 2003, 4 p.

Mäkinen J., H. Koivula and J. Ahola (2004). Absolute gravity measurements in Dronning Maud Land. Poster presentation in XXVII SCAR, 25-31 July, 2004, Bremen, Germany.

Mäkinen J., H. Koivula, M. Poutanen and V. Saaranen (2003). Vertical velocities in

Finland from permanent GPS networks and from repeated precise levelling. *Journal of Geodynamics*, 38, 443-456.

Ruotoistenmäki, T. and J. Lehtimäki (1999). Analysis of flow parameters of continental ice and permafrost geometry in underlying bedrock using geodetic and geophysical ground measurements on glaciated terrain in Queen Maud Land, Antarctica. Poster presented in: 8th International Symposium on Antarctic Earth Sciences, July 5-9, 1999, Wellington, New Zealand. <http://www.gsf.fi/~truotois/public/permafro/wellington.gif> (26.8.2004)

Sinisalo, A., A. Grinsted, J. Moore, E. Kärkäs and R. Petterson (2003). Snow accumulation studies in Antarctica with ground penetrating radar using 50, 100 and 800 MHz antenna frequencies. *Annals of Glaciology*, 37, 194-198.

Zwartz, D. and M. Helsen (2002). GPS Observations for Ice Sheet History (GOFISH). Institute for Marine and Atmospheric Research. Utrecht University, The Netherlands. http://www.phys.uu.nl/~wwwimau/research/ice_climate/gofish.pdf (26.8.2004)

Wingham, D.J., A.J. Ridout, R. Scharroo, R.J. Arthern and C.K. Shum (1998). Antarctic elevation change 1992 to 1996. *Science*, 282, 456-458.