

Basen-nunatakin moreenin kivilajisto läntisellä Kuningatar Maudin maalla, Etelämantereella

ARTO V. LUTTINEN JA JUSSI S. HEINONEN

Johdanto

Basen-vuori sijaitsee Etelämantereen läntisen Kuningatar Maudin maan rannikolla, aivan Riiser-Larsenin kelluvan jäähyllyn pohjakosketuslinjan tuntumassa (kuva 1a). Se on Vestfjellan vuorialueen pohjoisin nunatakki ja suomalaisen tutkimusasema Aboan kotivuori. Basenin korkein kohta on noin 580 m merenpinnan ja 380 m mannerjäätikön pinnan yläpuolella (kuva 1b). Vuori on yleismuodoltaan laakea, hieman pitkulainen lounais-koillissuunnassa ja noin 4 km x 1 km kokoinen. Basenia luonnehtii kumpuileva ylätasanko, joka rajautuu lännessä 200–300 m korkeaan jyrkänteeseen (kansikuva). Ylätasangon koillisosa on laajalta alueelta lumen peittämä, ja nunatakin itäinen puoli laskeutuu loivassa kullmassa jäätikön alle. Kallioperä on paljastunut nunatakin reuna-alueilla ja harjanteilla. Loivat rinteet ovat moreenin ja rakan peitossa, ja tasisilla alueilla maankamara on kokonaan moreenin peittämä. Huomattavimmat moreenipeitteet sijaitsevat vuoren kaakkoisosassa ja ylätasangolla (kuva 2). Uurrehavainnot osoittavat Basenin olleen kauttaaltaan jäätikön peittämä viime jäätiköitymismaksimin aikaan (Lintinen 1996).

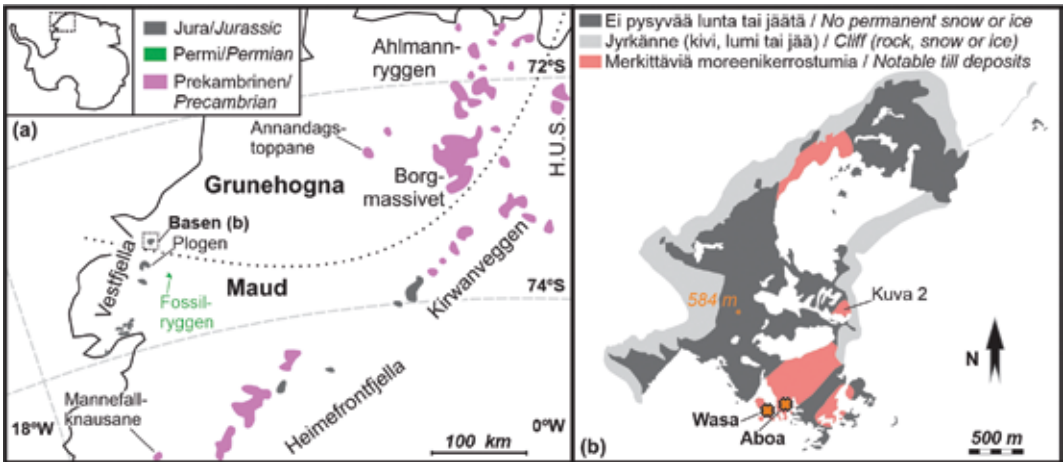
Basenin kallioperä koostuu pääasiassa jurakautisista laavakivistä ja niitä leikkaavista juonista. Paikoin laavakerrosten väleissä on ohuita ja katkeilevia klastisia välikerroksia (Luttinen 2021). Noin 50 km Basenilta etelään sijaitseva Fossilryggen on puolestaan permikautisten klastisten sedimenttien muodostama (kuva 1a; Hjelle & Winsnes 1972). Myös leikkaavat mafiset juonet ovat tavallisia Fossilryggenillä.

Pääosa Kuningatar Maudin maan näkyvästä kallioperästä on proterotsooista. Tätä kallioperää ei kuitenkaan ole paljastuneena Vestfjellalla, vaan lähimmät paljastumat sijaitsevat noin 150 km etäisyydellä Mannefallknausanen ja Heimefrontjellan vuorilla (kuva 1a).

Kuvailemme tässä artikkelissa Basenin moreenipeitteen kivilajeja. Työ perustuu FINNARP 2022 -tutkimusmatkan yhteydessä tekemiimme havaintoihin, kannettavalla röntgenfluoresenssispektrometrillä (Vanta VMR-CCC-G3) tehtyihin alkuaineanalyysiin (Luttinen & Heinonen 2023) ja kirjallisuuteen. Mannerjäätikön vallitseva virtausuunta on kohti pohjoista, joten moreenin aines on todennäköisesti peräisin pääasiassa Vestfjellan, Heimefrontjellan ja Mannefallknausanen väliseltä alueelta ja sen kivilajisto edustaa huomattavaa osaa läntisen Kuningatar Maudin maan mannerjään peittämästä kallioperästä. Erityisen mielenkiinnon kohteena työssämme ovat olleet kivilajit, joita ei ole aiemmin kuvattu läntisen Kuningatar Maudin maan kallioperässä.

Geologinen tausta

Läntisen Kuningatar Maudin maan kallioperässä voidaan erottaa neljä ikäryhmää: arkeinen (iältään >2 500 miljoonaa vuotta (Ma), mesoproterotsooinen (1 000–1 400 Ma), permikautinen (300–250 Ma) ja jurakautinen (200–146 Ma) (kuva 1a). Näkyvissä oleva kallioperä on pääosin mesoproterotsooista Maudin törmäysvyöhykettä, joka reunustaa arkeista Grunehognan kratonia (Jacobs ym. 1993). Kratonin alueella paljastunut kallioperä



Kuva 1. Läntisen Kuningatar Maudin maan yksinkertaistettu kallioperäkartta (a). Jurakautiset muodostumat ovat Karoo-provinssin laakiobasaltteja ja niihin liittyviä intruusioita, permikautiset erilaisia sedimenttikiviä. Heimefrontfjellalla ja Kirwanveggenillä basalttien alla on permikautisia muodostumia. Arkeaisen Grunehognan kratonin ja proterotsooisien Maudin vyöhykkeen raja on piirretty Cornerin (1994) mukaan. Kratonin on proterotsooisien kivien peittämä ja paljastuneena ainoastaan Annandagstoppanella. Basenin kartta, johon merkitty lumesta ja jäästä vapaat alueet, jyrkänteet ja merkittävät moreenikerrostumat (mukaillen Swedish Polar Research Secretariat 1991) (b). Basenin huipun korkeus on ilmoitettu keskimääräisestä merenpinnasta (Norwegian Polar Institute 1997).

Figure 1. Simplified bedrock map of western Dronning Maud Land (a). The Jurassic deposits are continental flood basalts and related intrusions of the Karoo province and the Permian deposits are various sedimentary rocks. Permian deposits are also underlying the basalts at Kirwanveggen and Heimefrontfjella. Lithospheric boundary between Archean Grunehogna craton and Proterozoic Maud Belt is after Corner (1994). The craton is exposed only at Annandagstoppane and otherwise covered with Proterozoic rocks. The map of Basen (after Swedish Polar Research Secretariat 1991) (b). Areas without permanent snow or ice cover, cliffs, and notable till deposits are marked on the map. The elevation of Basen peak is reported from average sea level (Norwegian Polar Institute 1997).

perä koostuu enimmäkseen arkeista pohjaa peittävästä proterotsooisista sedimentti- ja vulkaanisista kivistä ja niitä leikkaavista mafisista intruusioista (Wolmarans & Kent 1982). Arkeisen kallioperän ainoan paljastuma-alueen Annandagstoppanen vaaleasta graniitista tehdyt uusimmat U-Pb-ikämääritykset ovat 3067 ± 8 miljoonaa vuotta (Marschall ym. 2010). Grunehognan kratonin on ollut alkujaan yhteydessä eteläisen Afrikan Zimbabwe–Kapaal-kratoniin, ja Maudin törmäysvyöhyke on puolestaan Namaqua–Natalin törmäysvyöhykkeen jatke Etelämantereella (Jacobs ym. 1993). Kuningatar Maudin maan arkeisen ja proterotsooisien kallioperän raja on luultavasti lähellä Vestjellan pohjoista osaa (Corner 1994),

joskin eteläisellä Vestfjellalla on löydetty basaltissa ksenoliittina vaaleaa granitoidia, jonka Sm-Nd-isotooppikoostumus viittaa arkeiseen ikään (Luttinen & Furnes 2000).

Maudin törmäysvyöhykkeen kivilajit edustavat ennen törmäystä muodostuneita vulkaanisia saarikaaria ja merellisiä sedimenttikerrostumia sekä törmäyksen yhteydessä syntyneitä magmakiviä. Kivilajit puristuivat arkeista kratonia vasten noin 1 100 Ma sitten, kun supermanner Rodinia muodostui nk. Grenvillen aikaisessa orogeniassa (Jacobs 2009). Heimefrontfjellan ja Mannefallknau-sanen vuorilla proterotsooisien kallioperän itäinen puoli koostuu keskiasteen metamorfosisissa muokkautuneista suprakrustisista ja



Kuva 2. Basenin maisemaa kuvaan 1 merkityltä moreenialueelta. Merkittävät moreenialueet erottuvat hyvin vaaleiden permikautisten hiekkakivilohkareiden suuren määrän vuoksi (a). Taustan rakkavaltainen rinne on tummanruskea ja koostuu lähinnä paikalleen rapautuneista laakiobasalteista (b). Laakiobasalttikallioita on paljastunut paikoin moreenin seasta (c). Kuva: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.

Figure 2. Scenery of Basen from the till area marked as “Kuva 2” in Figure 1. Notable till deposits are clearly visible due to the high concentration of light-colored boulders of Permian sandstone (a). The hill on the background is dark brown and dominated by scree largely composed of more or less locally weathered flood basalts (b). Outcrops of flood basalt can be found in places (c). Photo: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.

intrusiivisistä aineksista. Metasedimenttikivet ovat kvartsiitteja, metapeliittejä, marmoreja ja paragneissejä. Raidalliset mafiset ja felsiset gneissit on tulkittu metavulkaniiteiksi. Mafinen gneissi on antanut metamorfoosin päävaiheelle iäksi 1 060 Ma. Erilaiset 1 150–1 050 Ma ikäiset granitoidit ovat tavallisia. Ikämäärityksissä havaittu 500 Ma sitten tapahtunut U-Pb-isotooppikellon nollautuminen on Pan-Afrikan orogeenian ikäinen. Kallioperän läntinen puoli jakautuu pohjoiseen ja eteläiseen osaan. Pohjoinen osa koostuu keskiasteen ja korkean asteen metamorfoosissa muokkautuneista vulkaanisen saarikaaren metasedimenteistä ja kalkkialkalisista granitoideista, kun taas eteläinen osa edustaa hyvin korkean asteen metamorfoosia. Eteläisen osan granulitit ovat usein porfyyrisiä granitoideja ja gneissejä (Bauer ym. 2009), ja esimerkiksi Mannefallknausanella kallioperä koostuu pääasiassa A-tyyppin metagraniteista ja charnokiiteista (Rämö ym. 2009). Proterotsooisen kallioperän itäisen ja läntisen osan välissä sijaitsee nk. Heimefrontfjellan hiertovyöhyke, jonka deformatiiviset granitoidit, gneissit ja myloniitit

muokkautuivat voimakkaimmin noin 500 Ma sitten, kun alue oli nk. Pan-Afrikan orogeenian läntinen reuna.

Vestfjellan alueella prekambriin kallioperä ei ole näkyvässä, mutta eteläisen Vestfjellan jurakautisissa lamproiittijuonissa on runsaasti ksenoliitteja (Luttinen ym. 2002). Romu (2019) on tutkinut ksenoliittien kivilajiston koostumusta, ikää ja syntyolosuhteita. Pääosa ksenoliiteista on mafisia ja felsisiä granulitteja, joiden U-Pb-iat ovat pääasiassa 1 300–1 010 Ma, joten eteläisen Vestfjellan proterotsooisen kallioperän on arvioitu kuuluvan yhteen eteläisen Heimefrontfjellan ja Mannefallknausanen granulitiialueen kanssa (Romu 2019).

Kuningatar Maudin maan fanerotsooiset pääkivilajit ovat permikautisia sedimenttikiviä ja jurakautisia magmakiviä. Kivilajeihin on tallentuneena Etelämantereen geologista historiaa Pangean supermantereen ja sen hajoamisen ajalta. Permikautisten kerrostumien synty ajoittuu vaiheeseen, jolloin kivihiihi- ja permikauden laaja jääkausi oli väistynyt ja Kuningatar Maudin maa sijaitti edelleen kylmäl-



Kuva 3. Moreenia noin 100 metriä Aboalta pohjoiseen. Suurin osa rusehtavista lohkeista on tiiviitä ja kestäviä basalttisten laavapatjojen keskiosia tai peräisin basaltteihin liittyvistä intruusioista (a). Osassa basalttilohkareista erottuu vaaleita kaasurakkuloita (b). Muuttuneimmat rakkulaiset basaltit ovat yleensä hajonneet vihertäväksi soraksi (c). Vaaleat lohkeat ovat permikautista hiekkakiveä (d), joka on paikoin hapettuneiden rautasulfidien kellertäväksi värjäämää (e). Kuvassa näkyy myös permikautista saviliusketta (f) sekä yksittäinen prekambriininen gneissilohkare (g). Mittatikun leveys on 13 senttimetriä. Kuva: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.

Figure 3. Till about 100 m north from Aboa. Most of the brownish boulders are dense and durable middle parts of basaltic lava flows or related intrusive rocks (a). Some of the basalt boulders contain amygdules (b). The most intensely altered basalts have usually been weathered to greenish rubble (c). The light-colored boulders are Permian sandstone (d), some of which show yellowish coloring related to oxidation of iron-bearing sulfides (e). Permian shale (f) and a single Precambrian gneiss boulder (g) can also be seen in the photograph. The width of the scale bar is 13 cm. Photo: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.

lä ilmastovyöhykkeellä. Jurakaudella alkanut Pangean supermantereen hajoaminen aiheutti Kuningatar Maudin maalla vulkanismia ja laajoja repäämävyöhykkeitä, jotka lopulta kehittyivät Intian valtamereksi. Permikerrostumia on näkyvissä proterotsooisien pohjan päällä Kirwanveggenin ja Heimefrontfjellan alueilla, missä niiden päälle on kerrostunut jurakautisia basalttilaavoja (esim. Jukes 1972). Lisäksi permikautisia kerrostumia ja niitä lävistäviä basalttisia juonia on näkyvissä Vestfjellan pohjoisosassa Fossilryggenin harjanteella (Hjelle & Winsnes 1972). Vestfjellan näkyvä kallioperä koostuu muutoin pelkästään jurakautisista

mafisista laavakivistä ja niihin liittyvistä intruusioista (Luttinen 2000; Vuori 2004; Heinonen 2011) sekä laavakivien välisistä ohuista sedimenttikivikerroksista. Jutustraumenin jäävirran lähistöllä proterotsooisessa kallioperässä on jurakautisia alkalisia plutoneja ja juonia (esim. Harris ym. 2002).

Basenin moreenialueet ovat syntyneet kvartaarikaudella (Jonsson 1988; Lintinen 1996). Ne erottuvat usein ympäröiviä kallioja rakka-alueita vaaleampina, sillä moreenissa on runsaasti vaaleanruskeita permikautisia hiekkakiviä (kuvat 2 ja 3).



Kuva 4. Jurakautisiin laakiobasaltteihin liittyviä lohkkareita Basenin moreenista. Näytteessä (a) on sekundaarisella mineraaliaineksella täyttyneitä piippurakkuloita basalttisen laavapatjan alaosasta. Näyte (b) on tiivistä basalttia paksun laavapatjan keskiosasta tai intruusiosta (juoni tai sill). Basalttilohkkareessa (c) on liistakkeisten plagioklaasimaasälpähajarakeiden kasaumia. Näitä tavataan joidenkin Basenin laavapatjojen ylemmistä osista. Manteleita sisältävä näyte (d) on laavapatjan rakkulaista yläosaa. Vihreä väri johtuu hydrotermisestä muuttumisesta. Näytteissä (e) ja (f) on suuria yksittäisiä basaltin kaasurakkuloita, jotka ovat täyttyneet osittain sekundaarisella mineraaliaineksella (kvartsi ja kalsiitti). Kuva: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.

Figure 4. Boulders related to Jurassic flood basalts from Basen till. Sample (a) is from a basal part of a lava flow and contains pipe vesicles filled with secondary minerals. Sample (b) is a dense basaltic rock either from the middle part of a thick lava flow or from an intrusion (dike or sill). Basalt sample (c) contains glomerocrysts of lathy plagioclase. These are known from the upper parts of some lava flows at Basen. Sample (d) contains amygdules and is from a vesicular upper part of a lava flow. The green color is due to hydrothermal alteration. Samples (e) and (f) contain large individual vesicles partly filled with secondary minerals (quartz and calcite). Photo: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.

Basen-nunatakin moreenin kivilajit

Jurakautiset kivilajit

Eniten moreenin kiviaineksessa on jurakautisia magmakiviä (kuva 3). Ne erottuvat ruskean ja vihreän sävyisinä (kuvat 4 ja 5). Vihreät kivet ovat voimakkaasti hydrotermisesti muuttunutta ja alunperin huokoista laavaa. Niiden magmaattiset mineraalit ovat muuttuneet etenkin kloriitiksi, karbonaateiksi, serisiitiksi ja epidootiksi. Ruskeat kivet ovat peräisin laavakerrosten ja niitä leikkaavien juonien (Luttinen 2000) tiivistä osista, joissa magmaattiset mineraalit ovat säilyneet paremmin. Jurakautisten kivien joukosta erottuu kaksi

omaleimaista ryhmää. Ferropikriitit (ml. meimechiitit), jotka esiintyvät alueella juonikivinä, sisältävät runsaasti suuria oliviinihajarakeita (kuva 5). Vaikka ferropikriitit (Hanski 1992) ovat maailmanlaajuisesti harvinainen kivilaji, ne ovat Vestfjellan alueen vulkanismin alkukantaisin magmakivityyppi ja niiden ajatellaan edustavan Vestfjellan paksun laavakerroksen pääasiallista vaippalähdettä (Heinonen 2011; Heinonen ym. 2016). Toinen poikkeava ryhmä edustaa laavakerrosten välissä siellä täällä sijaitsevia klastisia välikerroksia. Nunatakin lounaisosassa on kaksi hiekkakivikerrostumaa, mutta useimmiten välikerrokset ovat hienorakeista, tiivistä, ja keraamisen näköistä



Kuva 5. Jurakautisten ferropikriitti-/meimechiittjuonien lohkareita Basenin moreenista. Sekundaarisen muuttumisen voimakkuus kasvaa oikealta vasemmalta. Näytteissä (b) ja (c) oliiviinihajarakeet ovat vielä osittain terveitä (vihertäviä), mutta näytteessä (a) ne ovat muuttuneet kokonaan serpentiiniksi. Myös näytteen (a) ruskea perusmassa paljastaa näytteen olevan sekundaarisesti muuttunut. Kuva: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.

Figure 5. Boulders related to Jurassic ferropicrite/meimechite dikes from Basen till. The intensity of secondary alteration increases from right to left. In samples (b) and (c) olivine phenocrysts are rather fresh (greenish), but in sample (a) they have been completely altered to serpentine. Also, the brownish ground-mass of sample (a) reveals it to be altered. Photo: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.



Kuva 6. Jurakautisten laakiobasalttipatjojen väliin kivettyneitä ”boleja” Basenilta. Näytteissä (a) ja (b) kontakti vihertävään rakkulaiseen ja muuttuneeseen basalttilaavan pintaan on edelleen näkyvissä. Näytteessä (c) näkyy häiriintynyttä raitaisuutta, joka on mahdollisesti kivetymistä edeltävä rakenne. Kuva: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.

Figure 6. Boles lithified between Jurassic basaltic lava flows from Basen. The contact with a greenish vesicular and altered surface of a basalt is visible in samples (a) and (b). Irregular banding in sample (c) is probably a structure that precedes lithification. Photo: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.



Kuva 7. Permikautisiin hiekkakiviin liittyviä lohkareita Basenin moreenista. Hiekkakivissä voi nähdä yleisesti kerroksellisuutta (a) ja harvoin makroskooppisia kasvifossiileja (b) tai eläinten kaivautumisjälkiä (c). Näytteissä (d–i) on erilaisia kerrostumisen jälkeen muodostuneita rakenteita (saostumia ja konkreetioita). Yleisesti tavataan sekundaaristen rautasulfidikonkreetioiden hapettumisesta syntyneitä kellertävää saostumaa (d), jonka suuri määrä voi värjätä koko lohkareen (e). Kuvan takarivissä on muita konkreetioita (f–i). Suuret pyöreät konkreetiot (g–i) ovat tavallisia Fossilryggenin hiekkakivissä. Kuva: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.

Figure 7. Boulders related to Permian sandstones from Basen till. Sandstone commonly shows layering (a) and rarely macroscopic plant fossils (b) or trace fossils of animals (c). Samples (d–i) exhibit different kinds of structures formed after deposition (precipitates and concretions). A common feature is yellowish precipitate caused by oxidation of iron sulfide concretions (d), which in large quantities can color the whole boulder (e). The back row of the photograph illustrates other concretions (f–i). Large, rounded concretions (g–i) are typical of sandstones found at Fossilryggen. Photo: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.

punaista tai vihreää ainesta (kuva 6). Näitä niin kutsuttuja bole-kerroksia syntyy basalttien rapautumisen, tuhkapurkausten ja tuulen sekä veden kerrostamisen seurauksena. Usein niissä näkyy päälle purkautuneen laavan aiheuttamaa deformaatiota, ja ne myös sisältävät pieniä laavakappaleita.

Permikautiset sedimenttikivet

Permikautiset hiekkakivet antavat Basenin moreenille vaalean sävyn (kuva 7). Useimmat hiekkakivet ovat vaaleanruskeita ja niissä erottuu kerroksellinen rakenne; toisinaan

kivissä on konglomeraattikerroksia. Useissa hiekkakivissä on sedimentin epäpuhtauksien kasautumisesta syntyneitä konkreetioita (kuvat 7d–i). Rikkikiisukonkreetiot erottuvat keltaisen ja punaisen sävyisinä osina, kun taas kalkkikonkreetiot ovat synnyttäneet jopa lähes metrin halkaisijaltaan olevia pallosia, jotka haljetessaan synnyttävät kivisiä ”kuppeja”. Rikkikiisukonkreetiot ovat joskus muodoltaan kuutioita (kuva 7e). Pieniä tummia konkreetioita sisältävät kivet erottuvat ”panterikuosisina” (kuva 7f). Myös harmaat ja mustat permikautiset liuskeet ovat tavallisia moreenin



Kuva 8. Permikautisiin saviliuskeisiin liittyviä lohkareita Basenin moreenista. Saviliuskelohkareet ovat usein teräväsärmäisiä ja ohuiksi laatoiksi lohkeilevia (a), mutta myös pyöristyneempiä kappaleita tavataan (b). Konkreetiot (b) ovat harvinaisia. Verrattain yleisiä ovat erilaiset makroskooppiset kasvfossiilit, jotka erottuvat joko hopeanhoitoisina jäänteinä (c) tai tummina painaumuina (d, näytteen vasen alakulma). Kuva: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.

Figure 8. Boulders related to Permian shales from Basen till. The boulders are commonly sharp and can be split to thin slices (a), but also more rounded boulders are known (b). Concretions (b) are rare. Macroscopic plant fossils are rather common and can be distinguished either as silvery remains (c) or dark imprints (d, lower left corner of the sample). Photo: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.

joukossa (kuva 8). Niissä on usein nähtävissä fossiilisia kasvosia, kuten juuria (kuva 8c) ja *Glossopteris*-suvun kasvien lehtiä (kuva 8d). Hiekkakivissä kasvfossiilit ovat harvinaisia (kuva 7b), mutta pohjaeläinten kaivautumisjäljet yleisempiä (kuva 7c).

Muut sedimenttikivet

Moreenissa on myös sedimenttikiviä, jotka ovat erilaisia kuin Fossilryggenin kalliopaljastumien permikautiset kerrostumat. Näiden kivilajien ikä on tuntematon. Useimmat tällaisista sedimenttikivistä ovat punaisia kerroksellisia ja ristikerroksellisia hiekkakiviä (kuvat 9a–c). Erikoisuuksia sedimenttikivien joukossa ovat epäkypsästä sorasta syntyneet konglomeraatit (kuvat 9d–e). Kuvassa 9e näkyvän konglomeraatin tummien klastien alkuainekoostumus viittaa niiden vulkaaniseen alkuperään.

Prekambriset kivilajit

Moreenissa on harvakseltaan magmaattisia, metamorfoituneita ja deformatuneita kivilajeja, jotka ovat todennäköisesti prekambrista alkuperää (kuvat 10–13). Havaitimme siellä täällä kiilleliuskeita, joissa erottuu hiekkaisia ja savisia osia (kuva 10a), kun taas eriväriset kvartsiitit ovat melko tavallisia (kuvat 10 b–f). Myös amfiboliitit ovat melko yleisiä ja ne erottuvat moreenissa helposti lähes mustan värinsä ansiosta (kuvat 11 a–b). Sitä vastoin deformatumattomat mafiset syväkivet ovat harvinaisia. Vestfjellan eteläisissä osissa olevat jurakautiset mafiset plutonit (Vuori 2004) ovat ilmisuultaan ja koostumukseltaan hyvin erilaisia kuin moreenin mafiset syväkivet. Arvelemme viimemainittujen edustavan prekambrisia kallioperän osia. Alkuainekoostumukseltaan kuvan 11 mafiset lohkareet ovat subalkalisia:



Kuva 9. Erilaisia sedimenttikivilohkareita Basenin moreenista. Lohkareiden alkuperä on epäselvä, sillä niitä vastaavia kiviä ei tunneta Fossilryggeniltä. Osa voi olla myös peräisin jurakautisten basalttien välisistä hiekkakivikerroksista. Näytteet (a) ja (b) ovat punertavia hiekkakiviä. Näytteessä (a) on pyöreitä konkreetioita. Näyte (c) on punertava konglomeraatti, jossa on kerroksellisuutta. Näytteet (d) ja (e) ovat hyvin epäkypsiä ja huonosti lajittuneita hiekkakiviä/konglomeraatteja. Näytteen (e) tummanvihreät klastit ovat mahdollisesti peräisin basalteista. Kuva: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.

Figure 9. Various sedimentary rock boulders from Basen till. The origin of the boulders is uncertain, since similar rocks are not known from Fossilryggen. Some of them may be derived from sandstone layers found interlayered with the Jurassic flood basalts. Samples (a) and (b) are reddish sandstones. Sample (a) contains round concretions. Sample (c) is a reddish conglomerate with layering. Samples (d) and (e) are very immature and poorly sorted sandstones/conglomerates. Dark green clasts in (e) have possibly been derived from basaltic rocks. Photo: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.



Kuva 10. Metamorfoituneiden, todennäköisesti prekambriksen, sedimenttikivien lohkareita Basenin moreenista. Näyte (a) on tumma kiilleliuske/kiillegneissi ja näyte (b) on raitainen metahiekkakivi. Molemmissa on todennäköisesti jäänteitä alkuperäisestä kerroksellisuudesta. Näytteet (c–f) ovat erilaisia kvartsiitteja. Näytteessä (c) on alkuperäistä kerroksellisuutta ja näytteessä (e) voimakas rautapigmentti. Kuva: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.

Figure 10. Metamorphic, likely Precambrian, sedimentary rock boulders from Basen till. Sample (a) is a dark mica schist/gneiss and sample (b) is a banded metasandstone. Both likely exhibit traces of primary layering. Samples (c–f) are various quartzites. Sample (c) exhibits primary layering and sample (e) has a strong iron pigment. Photo: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.



Kuva 11. Todennäköisesti prekambrisia metagabroidi- ja amfiboliittilohkareita Basenin moreenista. Näytteissä (a) ja (b) on runsaasti amfibolia, jälkimmäisessä puikkomaista. Näytteissä (c) ja (d) on suhteessa enemmän vaaleaa plagioklaasimaasälpää. Kuva: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.

Figure 11. Probably Precambrian metagabbroid and amphibolite boulders from Basen till. Samples (a) and (b) contain abundant amphibole, acicular in the latter. Samples (c) and (d) contain relatively higher amount of plagioclase. Photo: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.



Kuva 12. Prekambrisia, korkean metamorfoosiasteen gneissi- ja migmatiittilohkareita Basenin moreenista. Tummissa osissa on paljon kiillettä ja amfibolia, vaaleissa osissa kvartseja ja maasälpää. Kuva: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.

Figure 12. Precambrian, strongly metamorphosed gneiss and migmatite boulders from Basen till. Dark-colored parts contain a lot of mica and amphibole, light-colored parts are dominated by quartz and feldspar. Photo: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.

gabroidit ovat toleiittisia ja amfiboliitit ovat kalkkialkalisia.

Amfiboliittien lisäksi erilaiset gneissit ja granitoidit voidaan suurella varmuudella tunnistaa prekambrisiksi kivilajeiksi. Gneissit ovat melko harvinaisia; useimmat tutkimistamme lohkareista olivat kiillegneissejä (kuva 12 b–c), mutta löysimme myös sarvivälkerikkaita raidallisia gneissejä (kuva 12 a, d).

Granitoidit ovat moreenissa harvinaisia, mutta ne erottuvat muista kivilajeista helpos-

ti. Löysimme sekä harmaita että punertavia granitoideja (kuva 13). Granitoidien joukossa havaitsimme deformatumattomia (kuva 13 a, f) ja vaihtelevasti deformatuneita tyypejä (kuva 13 b–e).

Paljon rautaa sisältävät kivet

Muutamassa paikassa moreenissa on havaittu ”metallinkiiltoisia” lohkareita (kuva 14). Niiden rapautumis-pinta on ruosteinen tai sinertävä, ja ne ovat voimakkaasti magneettisia. Loh-



Kuva 13. Prekambrisia granitoidilohkareita Basenin moreenista. Näytteessä (a) kalimaasälpä on harmah-tavaa, muissa punaista. Kaikissa näytteissä plagioklaasimaasälpä on mattavalkoista ja kvartsi harmah-tavan läpikuultavaa. Tummat mineraalit ovat pääasiassa kiillettä. Näytteissä (b–d) näkyy suuntausta ja gneissimäistä raitaisuutta. Jotkin niistä voivat edustaa migmatitiittien leukosomeja. Kuva: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.

Figure 13. Precambrian granitoid boulders from Basen till. In sample (a) K-feldspar is grayish, in others it is red. In all samples plagioclase feldspar is matte white and quartz grayish and transparent. Dark minerals are dominantly mica. Samples (b–d) exhibit foliation and gneissic banding. Some of them may represent migmatite leucosomes. Photo: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.

kareet ovat ainakin kahta eri kivilajia: raitaista rautamuodostumaa (*banded iron formation, BIF*) ja magnetiitista sekä magneettikiisusta koostuvaa massamaista kiveä.

Pohdintoja jäätikönläisen kallioperän koostumuksesta ja merkityksestä

Basenin moreenin kivilajisto vastaa paljolti läntisen Kuningatar Maudin maan kallioperä-kartoituksen tuloksia. Mannerjäätikön vallitseva virtaussuunta on oletettavasti ollut etelästä pohjoiseen (Lintinen 1996), joten moreenin aines on peräsin Fossilryggenin ja Plogenin suunnalta (kuva 1). Tämä sopii yhteen sen

havainnon kanssa, että jurakautiset laavakivet ja intrusiiviset kivet (kuvat 4–6) sekä permikautiset sedimenttikivet (kuvat 7 ja 8) ovat moreenin pääkivilajeja. Ympäröivän jäätikön pohja on siten todennäköisesti laajalla alueella permi- ja jurakautisten kerrostumien päällä. Emme löytäneet varmuudella moreenista jurakautisia syväkiviä, vaikka geofysikaaliset mittaukset viittaavat niiden olemassaoloon Basenin, Plogenin ja Fossilryggenin välissä (Ruotoistenmäki & Lehtimäki 2009).

Moreenin kivilajien joukossa deformoitumattomat punaiset hiekkakivet ja konglomeraatit (kuva 9) poikkeavat aiemmin kuvatuista permikautisista sedimenttikivistä ja saattavat olla aiemmin tuntemattomia varhaispaleotsooisia kerrostumia. Ne voivat



Kuva 14. Paljon rautaa sisältäviä lohkareita Basenin moreenista. Näytteistä on näkyvillä sekä rapautumis- pinta (1) että sahattu pinta (2). Molemmissa näytteissä on rapautumispinnalla tummanviolettiä ja metal- linhoitoista, todennäköisesti mangaaniyhdisteistä koostuvaa, saostumaa. Näyte (a) on massamainen ja siinä on läpikotainen magneettikiisupirote. Näyte (b) on prekambrista raitaista rautamuodostumaa. Siinä vuorottelevat tummat magneittikerrokset ja vaaleat silikaattikerrokset, jotka tulevat esiin sahauspinnalla. Kuva: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.

Figure 14. Iron-rich boulders from Basen till. Weathered surface (1) and sawed surface (2) are displayed from samples (a) and (b). Both weathered surfaces show dark purple colors with a metallic luster, possibly caused by manganese-bearing compounds. Sample (a) is massive and contains highly abundant disseminated pyrrhotite. Sample (b) is a piece of Precambrian banded iron formation. It exhibits alternating dark magnetite and light silicate layers, which are visible on a sawed surface. Photo: Jussi Heinonen / FINNARP 2022.

vaihtoehtoisesti vastata myös Grunehogan kratonin prekambria, heikosti metamorfoituneita ja deformatumattomia suprakrustisia kivilajeja, joissa alkuperäiset rakenteet – kuten ristikerroksellisuus ja aallonmerkit – ovat yleisiä (Krynauw ym. 1988; Moyes ym. 1995).

Moreenin prekambriset kvartsiitit, kalkkialkaliset amfiboliitit, toleittiset gabroidit, gneissit ja granitoidit (kuvat 10–13) muistuttavat Heimefrontfjellan kallioperän pohjoisosan kivilajeja. Granuliittivyöhykkeelle tyypillisiä porfyyrisiä graniitteja, charnockiitteja tai granaattipitoisia metagabroja ei havaittu. Vainuttaa siis siltä, että läntisen Kuningatar Maudin maan granuliittivyöhyke rajoittuu eteläisen Heimefrontfjellan, Mannefallknausanen ja eteläisen Vestfjellan alueille (vrt. Romu 2019).

Paljon rautaa sisältävät kivilajit (kuva 14)

ovat peräisin tuntemattomilta kallioperäalueilta. Magneitti-magneettikiisukivi lienee magmasyntynen ja sen synty voi liittyä mihin tahansa prekambriiseen tai nuorempaan magmaattiseen vaiheeseen. Raitaisten rautamuodostumien synty on tyypillisesti liitetty prekambriin, ja niitä on aiemmin raportoitu Namaqua-Natalin törmäisyvyöhykkeessä (Barton ym. 1986). Prekambriinen alkuperä onkin todennäköinen sekä tässä työssä kuvatuille, että aiemmin Basenin moreenista kerätyille raitaisille rautamuodostumille (hematiittikummingtoniitti; Jaakko Siivola, henkilökohtainen tiedonanto 1997).

Läntisen Kuningatar Maudin maan kallioperä on maapallon ja erityisesti mannerten geologisen kehityksen tutkimuksessa tärkeä kohde. Alue on mm. keskeinen pala arkeisten,

Kuva 15. Basenin moreeni-
museo. Koordinaatit
(WGS84): S 73°02.4703,
W 013°24.4570. Kuva: Jussi
Heinonen / FINNARP 2022.

Figure 15. Basen till museum.
Coordinates (WGS84): S
73°02.4703, W 013°24.4570.
Photo: Jussi Heinonen /
FINNARP 2022.



proterotsooisten ja fanerotsooisten superman-
nerten rekonstruktioissa (esim. Salminen ym.
2021), mutta vain murto-osa kallioperästä on
näkyvissä ja olosuhteet rajoittavat tutkimus-
mahdollisuuksia. Basenin moreenin kivila-
jisto avaa uusia näkymiä läntisen Kuningatar
Maudin maan kallioperään. Moreenin kivila-
jit tarjoavat kalliopaljastumia edustavamman
aineiston jäänalaisen kallioperän litologisen,
geokemiallisen, geofysikaalisen ja geokrono-
logisen vaihtelun määrittämiseen. Moreenin
kivilajisto onkin eräänlainen ”köyhän tutkijan”
kairasydänvarasto, jonka näytteet ovat sekaisin,
mutta joka voi silti merkittävällä tavalla tukea
esimerkiksi alueen geofysikaalista kartoitusta
(esim. Corner 1994; Ruotoistenmäki & Leh-
timäki 2009) ja vaikkapa magmojen ja maan-
kuoren vuorovaikutusten tutkimuksia (esim.
Heinonen ym. 2016).

Lopuksi

Artikkelissa kuvattuja näytteitä on ikäryhmit-
tään esillä Basenin Moreenimuseossa (kuva
15), joka löytyy noin 80 metrin etäisyydeltä
Aboan vanerihallista kohti pohjoisluodetta.
Ulkoilmamuseo on ilmainen ja avoinna kel-
lon ja vuoden ympäri, mutta suosittelemme
museossa vierailua eteläisen pallonpuoliskon
kesän aikana.

Kiitokset

Lämpimät kiitokset koko muulle FINNARP
2022 -retkikunnalle (Mika Kalakoski, Priit
Tisler, Jukka Huuromonen, Tapio Hyppänen,
Sanna Häkkänen, Leena Leppänen, Aleksi
Rimali, ja Antero Kukko). Erityiskiitokset ret-
kikunnan johtajalle Mika Kalakoskelle, joka
löysi raitaisesta rautamuodostumasta koostu-
van lohkarren.

FT, DOS. ARTO V. LUTTINEN

(arto.luttinen@helsinki.fi)

Luonnontieteellinen keskusmuseo
Helsingin yliopisto

FT, DOS. JUSSI S. HEINONEN

(jussi.s.heinonen@helsinki.fi)

Luonnontieteellinen keskusmuseo
Helsingin yliopisto

Geotieteiden ja maantieteen osasto
Helsingin yliopisto

Geologi och mineralogi

Åbo Akademi

*Yli-intendentti Arto Luttinen ja tutkijatohtori Jussi
Heinonen muodostivat FINNARP 2022 -retkikun-
nan geologiatiimin. Kenttätyöt olivat osa Suo-
men Akatemian rahoittamaa VALVE-projektia
(projektinnumero 305 663) ja niissä keskityttiin
jurakautisen laakiobasalttimuodostuman yksityis-
kohtaiseen kartoitukseen ja analysointiin kannet-
tavalla röntgenfluoresenssispektrometrillä. Idea tähän
käsikirjoitukseen syntyi vapaa-aikana paikan päällä.*

Summary

Rock types in till on Basen nunatak, western Dronning Maud Land, Antarctica

A collection of different rock types sampled from the glacial till cover on nunatak Basen was examined during the FINNARP 2022 expedition to the Vestfjella mountains, western Dronning Maud Land, Antarctica. Visual inspection and geochemical analysis using a portable Vanta VMR-CCC-G3 X-ray fluorescence spectrometer (Luttinen & Heinonen, 2023) enabled division of the rock types into five main categories: (1) Jurassic rocks, (2) Permian sedimentary rocks, (3) Other sedimentary rocks, (4) Precambrian rocks, and (5) iron-rich rocks. The Jurassic rocks are variably amygdaloidal flood basalts and associated dolerites and ferropicrites, as well as sedimentary interlayers (e.g. boles) similar to those that comprise the nunataks of north Vestfjella. The Permian rocks are sandstones and shales similar to those exposed at the nearby Fossiryggen nunatak. They frequently contain calcareous and sulphide concretions, or fossil plants and traces. The category of other sedimentary rocks includes red sandstones and notably immature conglomerates different from the exposed Permian bedrock. The Precambrian rocks include recrystallised sandstone, mica schist, as well as various quartzites, gneisses, migmatites, variably deformed granitoids, amphibolites, and metagabbroids. Broadly similar rock types make up the bedrock of the northern parts of the Heimefrontjella mountains ca. 200 km to SE from Basen. The iron-rich rocks represent a massive magnetite-pyrrhotite rock and a banded iron formation. Neither rock type has been previously reported in the region. We interpret the category of other sedimentary rocks to represent previously unknown early Paleozoic strata or correlates of the weakly deformed Precambrian cover of the Archean

Grunehogna craton. We regard the iron-rich rocks to be of Precambrian age. Overall, rock types in glacial till provide a more representative picture of the regional bedrock than the exposed nunataks. Accordingly, examination of rock types in glacial till using geochemical, geophysical, and geochronological methods may provide substantial support to regional geophysical mapping and, for example, research on magma-crust interaction.

Lähdeluettelo

- Barton, E. S., Armstrong, R. A., Cornell, D. H. & Welke, H. J., 1986. Feasibility of total-rock Pb-Pb dating of metamorphosed banded iron formation; the Marydale Group, southern Africa. *Chemical Geology* 59, 255–271. [https://doi.org/10.1016/0168-9622\(86\)90075-8](https://doi.org/10.1016/0168-9622(86)90075-8)
- Bauer, W., Jacobs, J., Thomas, R. J., Spaeth, G. & Weber, K., 2009. Geology of the Vardeklettane Terrane, Heimefrontjella (East Antarctica). *Polarforschung*, 79, 29–32.
- Corner, B., 1994. Geological evolution of western Dronning Maud Land within a Gondwana framework: Geophysics subprogramme. Final project report to SACAR. Department of Geophysics, Witwaterstrand University, South Africa, 21 s.
- Hanski, E. J., 1992. Petrology of the Pechenga ferropicrites and cogenetic Ni-bearing gabbro-wehrlite intrusions, Kola Peninsula, Russia. *Geological Survey of Finland, Bulletin* 367, 192 s.
- Harris, C., Johnstone, W. P. & Phillips, D., 2002. Petrogenesis of the Mesozoic Siste fjell syenite intrusion, Dronning Maud Land, Antarctica and surrounding low- $\delta^{18}\text{O}$ lavas. *South African Journal of Geology* 105, 205–226. <https://doi.org/10.2113/1050205>
- Heinonen, J. S., 2011. Geochemistry and petrology of the ferropicrite dikes and associated rocks of Vestfjella, western Dronning Maud Land, Antarctica. Väitöskirja. Geotieteiden ja maantieteen laitos, Helsingin yliopisto, Helsinki, 50 s.
- Heinonen, J. S., Luttinen, A. V. & Bohron, W. A., 2016. Enriched continental flood basalts from depleted mantle melts: modeling the lithospheric contamination of Karoo lavas from Antarctica. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 171, 9. <https://doi.org/10.1007/s00410-015-1214-8>
- Hjelle, A. & Winsnes, T., 1972. The sedimentary and volcanic sequence of Vestfjella, Dronning Maud

- Land. Teoksessa: Adie, R. J. (toim.), *Antarctic Geology and Geophysics*. Universitetsforlaget, Oslo, Norway, 539–547.
- Jacobs, J., 2009. A review of two decades (1986–2008) of geochronological work in Heimefrontfjella, and geotectonic interpretation of western Dronning Maud Land, East Antarctica. *Polarforschung*, 79, 47–57.
- Jacobs, J., Thomas, R. J. & Weber, K., 1993. Accretion and indentation tectonics at the southern edge of the Kaapvaal craton during the Kibaran (Grenville) orogeny. *Geology* 21, 203–206. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1993\)021%3C0203:aaitar%3E2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1993)021%3C0203:aaitar%3E2.3.co;2)
- Jonsson, S., 1988. Observations on physical geography and glacial history of the Vestfjella nunataks in western Dronning Maud Land, Antarctica. *Naturgeografiska Institutionen, Stockholms Universitet, Rapport 68*, Sweden, 57 s.
- Juckles, L. M., 1972. The geology of north-eastern Heimefrontfjella, Dronning Maud Land. *British Antarctic Survey Scientific Reports* 65, 44 s.
- Krynauw, J. R., Hunter, D. R. & Wilson, A. H., 1988. Emplacement of sills into wet sediments at Grunehogna, western Dronning Maud Land, Antarctica. *Journal of the Geological Society* 145, 1019–1032. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.145.6.1019>
- Lintinen, P., 1996. Evidence for the former existence of a thicker ice sheet on the Vestfjella nunataks in western Dronning Maud Land, Antarctica. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 68, 85–98. <https://doi.org/10.17741/bgsf/68.1.007>
- Luttinen, A., 2000. Origin of Jurassic Vestfjella flood basalts, Dronning Maud Land, Antarctica. *Väitöskirja, Helsingin yliopisto, Helsinki* 106 s.
- Luttinen, A. V., 2021. Dronning Maud Land Jurassic volcanism: volcanology and petrology. Teoksessa: Smellie, J. L., Panter K. S. & Geyer, A. (toim.), *Volcanism in Antarctica: 200 million years of subduction, rifting and continental break-up*. Geological Society of London, *Memoir* 55, 157–181. <https://doi.org/10.1144/m55-2018-89>
- Luttinen, A. V. & Furnes, H., 2000. Flood basalts of Vestfjella: Jurassic magmatism across an Archaean-Proterozoic lithospheric boundary in Dronning Maud Land, Antarctica. *Journal of Petrology* 41, 1271–1305. <https://doi.org/10.1093/petrology/41.8.1271>
- Luttinen, A. V. & Heinonen, J. S., 2023. Using portable XRF to analyze geochemistry of basaltic rocks in the field: example from Antarctica. Teoksessa: Heinonen, J. S. (toim.), *Abstracts of the 1st GeoDays, 14th–17th March 2023, Helsinki, Finland*. Proceedings of the Geological Society of Finland 3, 87.
- Luttinen, A. V., Zhang, X. & Foland, K. A., 2002. 159 Ma Kjadebeinet lamproites (Dronning Maud Land, Antarctica) and their implications for Gondana breakup processes. *Geological Magazine* 139, 525–539. <https://doi.org/10.1017/S001675680200674X>
- Marschall, H. R., Hawkesworth, C. J., Storey, C. D., Dhuime, B., Leat, P. T., ym., 2010. The Annandagstoppane Granite, East Antarctica: evidence for Archaean intracrustal recycling in the Kaapvaal-Grunehogna Craton from zircon O and Hf isotopes. *Journal of Petrology* 51, 2277–2301. <https://doi.org/10.1093/petrology/egq057>
- Moyes, A. B., Krynauw, J. R. & Barton, J. M. Jr., 1995. The age of the Ristcherflya Supergroup and Borgmassivet intrusions, Dronning Maud Land (Antarctica). *Antarctic Science* 7, 87–97. <https://doi.org/10.1017/s0954102095000125>
- Norwegian Polar Institute, 1997. *Vestfjella Aust, Maudheimvidda, Dronning Maud Land. Map, 1:250 000*. Norwegian Polar Institute, Oslo, Norway.
- Romu, K. I., 2019. Origin of the concealed continental crust of Vestfjella, western Dronning Maud Land, Antarctica: Evidence from xenoliths hosted by Jurassic lamproites. *Academic dissertation, Geological Survey of Finland, Bulletin* 409, 106 s.
- Ruotoistenmäki, T. & Lehtimäki, J., 2009. Geophysical and geodetic studies of bedrock, permafrost and continental ice in Queen Maud Land, Antarctica. *Geophysica* 45, 63–76.
- Rämö, O. T., Kurhila, M., Luttinen, A. V. & Andersen, T., 2009. U-Pb-Nd-Hf isotope geochemistry of the Mesoproterozoic A-type granites in Mannefallknausane, western Dronning Maud Land, Antarctica. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2009, abstract id. V51C-1687*.
- Salminen, J., Pehrsson, S., Evans, D. A. D. & Wang, C., 2021. Neoproterozoic–Paleoproterozoic supercycles. Teoksessa: Pesonen, L. J., Salminen, J., Elming, S.-Å., Evans, D. A. D. & Veikkolainen, T. (toim.), *Ancient Supercontinents and the Paleogeography of Earth*. Elsevier, Amsterdam, 465–498. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818533-9.00014-x>
- Swedish Polar Research Secretariat, 1991. *Basen, Vestfjella, Dronning Maud Land, Antarctica. Map, 1:5 000*. Environmental Department, Swedish Polar Research Secretariat, Stockholm, Sweden.
- Vuori, S. K., 2004. Petrogenesis of the Jurassic gabbroic intrusions of Vestfjella, Dronning Maud Land, Antarctica. *Väitöskirja, Helsingin yliopisto, Helsinki*, 25 s.
- Wolmarans, L. G. & Kent, L. E., 1982. Geological investigations in western Dronning Maud Land, Antarctica – a synthesis. *South African Journal of Antarctic Research, Supplement* 2, 93 s.