Maankuoren tutkimusta muovailuvahalla

Vuorten jylhät piirteet ovat aina kiehtoneet ihmisiä. Mutta se mikä kohoaa ylös, tulee myös alas.

KAISA NIKKILÄ

vekofenninen orogenia mylläsi Suomen kallioperää n. 1900 miljoonaa vuotta sitten, kun saarikaaren kappaleet törmäsivät toisiinsa ja Karjalan mantereeseen (kuva 1). Tässä vuorijononmuodostuksessa kuori paksuuntui, deformoitui ja osittain suli (Lahtinen *et al.* 2005). Jokainen näistä tapahtumista on jättänyt jälkensä ja ovat yhä nähtävissä kuoressa.

Lähes koko Suomen nykyinen maanpintaleikkaus kallioperästä edustaa 10–15 km syvyistä maankuorta. Kivilajimme kuvastavat siis muinaisen vuoriston juuriosia, joten voimme tutkia, mitä deformaatio ja osittaissulaminen vuoriston sisäosissa saivat aikaan miljoonia vuosia sitten.

Kuori kuin brie-juusto

Kallioperästämme on saatavilla paljon geologista ja geofysikaalista aineistoa. Lisätietoa kuoren rakenteesta saatiin 2000-luvun alussa seismisistä heijastusluotauksista (FIRE), jotka ylsivät jopa 100 km syvyyteen saakka (kuva 2; Kukkonen et al. 2006). Heijastusluotaukset toivat uutta tietoa esimerkiksi Keski-Suomen granitoidikompleksin (KSGK) rakenteesta, joka ei näyttänyt syvemmällä kuoressa yhtä yksinkertaiselta kuin mitä kallioperäkartoista olisi voinut kuvitella. Heijastusluotausprofiileissa nähdään esimerkiksi suuria rajapintoja, jotka ulottuvat maanpinnalta alakuoreen saakka. FIRE-luotaukset myös tukivat aikaisempia tutkimuksia siitä, että kuori on kolmikerroksinen (Korja et al. 1993, Kukkonen et al. 2006) ja paksu (50-65 km; Grad ja Tiira 2009).

Tektonisia malleja Svekofennisesta orogeniasta on julkaistu ennen FIRE-tutkimuksiakin (esim. Hietanen 1975, Gaál 1990, Lahtinen, 1994), mutta heijastusluotaukset antoivat toivottua lisätietoa keskusteluun Suomen kallioperän kehityksestä. Keskustelun kohteena ovat olleet myös isojen, kuoren läpimenevien rajapintojen alkuperä ja niiden viimeisin deformaatiovaihe. Näiden heijasteiden on tulkittu syntyneen vuorijonopoimutuksen aikana ja toimineen käänteissiirrospintoina (Sorjonen-Ward 2006, Kukkonen et al. 2008), mutta niiden on myös ehdotettu aktivoituneen törmäyksen jälkeisessä ekstensionaalisessa tapahtumassa (Korja et al. 2009, Nikkilä et al. 2015). Ekstension on ajateltu syntyneen paksuuntuneen maankuoren stabiloitumisvaiheessa eli painovoimaisessa kuoren romahtamisessa (kuva 3). Koko kuoren romahtamisen on mahdollistanut osittaissulamisen seurauksena syntynyt paksu ja duktiili kuorikerros. Tällaisen kuoren rakennetta voidaan verrata vaikkapa pöydälle jätettyyn brie-juustoon. Sulaessaan juuston sula keskiosa valuu pöydälle (= osittain sula kuorikerros) ja juuston kova kuori romahtaa alaspäin (= hauras yläkuori).

Tektonisen kehityksen mallintaminen

Maankuoren kehitysvaiheita voidaan tutkia lähinnä kallioperää ja sen rakenteita tarkastelemalla. Vaikka itse prosessit eivät ole näkyvissä, niitä voidaan mallintaa. Maankuoren kehitystä vuoriston synnyn jälkeen lähdettiin lähestymään *analogisella mallinnuksella* (kuva 4; Nikkilä *et al.* 2009, 2015). Mallinnuskohteeksi valittiin Keski-Suomen alue, jossa koko



FENNOSCANDIAN SHIELD (3.2 - 0.92 Ga)

Neoproterozoic

Sveconorwegian orogenic belt (1.10 - 0.92 Ga) partly reworking Paleo- to Mesoproterozoic rocks

Mesoproterozoic

Sedimentary rocks (1.50 - 1.27 Ga)
Rapakivi granite association (1.65 - 1.47 Ga)
Paleoproterozoic

Igneous rocks, TIB (1.85 - 1.66 Ga)

- Granite and migmatite (1.85 1.75 Ga)
- Lapland granulite belt (> 1.90 Ga)
- Supracrustal rocks (1.95 1.80 Ga)
 - Igneous rocks (1.96 1.84 Ga)
- Mafic intrusive rocks (2.50 1.96 Ga)
- Supracrustal rocks (2.50 1.96 Ga)

Archean

	Igneous rocks and gneiss (3.20 - 2.50 Ga) Supracrustal rocks (3.20 - 2.75 Ga)
	PHANEROZOIC SEDIMENTARY COVER AND IGNEOUS ROCKS
	Sedimentary rocks
	CALEDONIAN OROGENIC BELT (0.5 - 0.4 Ga) Phanerozoic rocks and reworked Paleo- to Neoproterozoic rocks
	OTHER SYMBOLS
	Shear Zones
-	FIRE Reflection lines 1, 2, 3, 3A

Kuva 1. Fennoskandian litologiset pääyksiköt (Lahtinen *et al.* 2005) ja seismiset linjat FIRE 1–3 ja 3A Tutkimusalue rajattu laatikolla (Kukkonen *et al.* 2006). Lyhenteet: CFGC – Keski-Suomen granitoidikompleksi; RLSC – Raahe-Laatokka hiertovyöhyke.

1

Figure 1.The main lithological units of Fennoscandia (Lahtinen et al. 2005) and the FIRE seismic profiles (Kukkonen et al. 2006). Box indicates the research area. Abbreviations: CFGC – Central Finland granitoid complex; RLSC – Raahe–Ladoga shear complex.

3 8



Kuva 2. FIRE 3 ja 3A -heijastusluotausprofiili ja tulkinta sen rakenteista. (A) Profiilissa nähtävät tummat heijasteet on tulkittu voimakkaiksi rajapinnoiksi kuten hiertovyöhykkeiksi. Kuvassa CM-pisteiden 17 880 ja 8000 välillä havaitaan loiva-asentoisia koko kuoren mittakaavaisia heijasteita. (B) Tulkinta kuoren rakenteesta. Metamorfoosiasteen jyrkkä muutos maanpinnalla on nähtävissä profiilissa rajapintaheijasteina tai hiertovyöhykkeinä. Näiden on tulkittu akti-/oituneen ekstensiossa ja edistäneen pystysuuntaista siirtymää, jonka vuoksi eri metamorfoosiasteen lohkoja tavataan nykyisin maanpintaleikkauksessa.

western and central parts of the Profile (CMP 8000-17,880). The reflective bands have been interpreted as large shear zones. (B) An interpretation of the Figure 2. An interpretation of the FIRE 3 profile. (A) A set of large crustal scale reflective bands are found between the depths of 0 km and 50 km, in the structure of the crust. The changes in the metamorphic grade reflect the positions of the high reflective bands in the seismic profile. kuoren mittakaavaiset heijastusluotauksen esiin tuomat rajapinnat sijaitsevat ja jossa aikaisemmat tutkimukset ovat ehdottaneet törmäyksen jälkeistä kuoren ekstensiota (mm. Lahtinen *et al.* 2005).

Mallintamisella haluttiin tutkia, miten paksuuntunut kuori käyttäytyisi romahduksessa ja voidaanko kyseisellä kuoren kehitysvaiheella selittää nykyisin nähtäviä geologisia ja geofysikaalisia havaintoja kuten heijastusluotauksissa havaittuja suuria rajapintoja.

Tarkemmin määriteltynä mallinnuksilla testattiin (1) millaisia rakenteita horisontaalisti virtaava duktiili kuoren keskikerros tuottaa; (2) miten jo olemassa olevat rajapinnat aktivoituvat ekstensiossa; (3) miten eri mekaa-

σ₁

Force due to gravity acting on thickened crust

 $\sigma = F/A$

 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$

Cross section:

 σ_{2}

nisen ominaisuuden omaavat kuorikappaleet deformoituvat ekstensiossa; ja lopuksi (4) voidaanko tutkimuksia korreloida Svekofennian orogeeniin (Nikkilä 2016). Vaikka tässä puhutaan kuoren romahduksesta, ovat mallinnukset vertailukelpoisia samankaltaisissa olosuhteissa syntyneessä kuoren ekstensiossa riippumatta siitä, onko duktiili virtaus romahduksen tai esimerkiksi kaaren tausta-altaan leviämisestä aiheutuvaa.

Lähtökohtana mallinnuksissa oli paksu kuori (nykyistä paksumpi), kolmikerrosrakenne sekä duktiili, horisontaalisesti virtaava keskikuori (eli ns. brie-rakenne; Nikkilä *et al.* 2009, 2015).



Figure 3. The lateral variations in gravitational potential energy attempts to level out topographic differences, which may result in extension of a thickened orogeny. Adapted from Nemčok et al. (2013).

Kuva 4. Analoginen malli. Analogiset mallit ovat pieniä kooltaan, mutta niillä voidaan mallintaa suuria tapahtumia. Kaikki mallin kerrokset ovat levinneet kohti vasenta. Duktiili, magentan värinen keskikerros oikealla on levinnyt duktiilin keskikerroksen (ruskea) ja vihreän alakerroksen yli, jolloin alkuperältään jyrkkä rajapinta on loiventunut huomattavasti (kääntynyt kohti leviämissuuntaa). Senttimetriskaala on kuvassa alavasemmalla.



Figure 4. An analog model. The models are small but can be effective tools in interpreting tectonic evolution. All the layers in the model have spread towards the left. The magenta layer in the middle has spread over the green and brown layers on the left, with the consequence that the boundary in between has also rotated towards the left. A centimeter scale is shown at lower left.

 σ_3

> Direction of flow

Mallinnukset osoittivat, että kuoren painovoimaisella romahduksella on seuraavat vaikutukset: (1) romahdus ohentaa pääasiassa duktiilia keskikuorta; (2) koko kuoren mittakaavan rajapintoja ei synny, jos rakenteita ei ole jo olemassa; (3) romahdus aiheuttaa horisontaalin virtauksen lisäksi passiivista poimutusta eli ylöskohoamista, joten kuoren kappaleet voivat joko kohota ylöspäin tai painua alaspäin, mikä aiheuttaa kilometrien pystysuuntaisia siirtymiä; (4) suurimmat siirtymät tapahtuvat, kun kuoressa on jo olemassa olevia rakenteita, jolloin syntyy pystysuuntaista liikettä sekä mekaanisilta ominaisuuksiltaan heikossa että vahvassa kuoressa (Nikkilä et al. 2015, Nikkilä 2016).

Mitä uutta opimme analogisista mallinnuksista?

Mallinnusten perusteella voidaan esittää, että kuoren romahdus ei vaikuta pelkästään sen ydinalueella vaan myös viereiset kuoren kappaleet deformoituvat. Tämä tarkoittaa sitä, että jos kuoren on ajateltu romahtaneen Keski-Suomen granitoidikompleksin alueella, se on myös vaikuttanut nykyisen Raahe-Laatokkavyöhykkeen itäpuolella. Täten kuoren romahdus n. 1880-1860 miljoonaa vuotta sitten voisi selittää monet tämän ikäiset deformaatiotapahtumat sekä Länsi- että Itä-Suomen alueella. Romahduksella voidaan myös selittää FIRE-heijastusseismisissä luotauksissa havaittujen suurien rajapintojen aktivoituminen ja niiden muoto (Nikkilä et al. 2015, Nikkilä 2016). On hyvin todennäköistä, että romahdus on kääntänyt Keski-Suomen alueella tavattavia rajapintoja sekä Raahe-Laatokka-vyöhykkeen hiertovyöhykkeitä kohti nykyistä länttä, sillä mallinnusten mukaan rakenteet kääntyvät horisontaalin virtauksen mukana (Nikkilä et al. 2015). Nykyiseen länteen suuntautunut virtaus voidaan selittää siellä olleella ohuemman kuoren alueella ja siten kuorella on ollut tilaa virrata kohti länttä (Korja *et al.* 2009).

KSGK:n alueella vallinneen deformaation tyypin ja ajankohdan tarkemmaksi määrittämiseksi alueella tehtiin rakennegeologinen ja petrologinen tutkimus (Nikkilä et al. 2016). KSGK:n tyypillisiä, isoja hiertovyöhykkeitä pyrittiin ajoittamaan, mutta ajoitusyritykset olivat tuloksettomia. Plutonisista kivistä otetut zirkoni-U-Pb-iät kuitenkin osoittavat, että kaikki plutoniset kivet ovat nuorempia kuin vuorijononmuodostuksen aiheuttama törmäys (Nironen 2003, Lahtinen et al. 2016, Nikkilä et al. 2016) ja että deformaatiota on tapahtunut ennen plutonisten kivien jähmettymistä, jähmettymisen aikana ja sen jälkeen (Nikkilä et al. 2016). Deformaatio ei myöskään indikoi kiven ikää, vaan deformoitumaton kivi voi olla samanikäinen tai vanhempi kuin läpikotaisesti deformoitunut kivi. Esimerkiksi samanikäistä granodioriittia ja graniittia löytyi sekä läpikotaisin deformoituneena että tävsin deformoitumattomana (Nikkilä et al. 2016). Deformaatio vaihtelee kuitenkin duktiilista semiduktiiliin ja heijastelee asteittain ikäjakaumaa. Tämä sopii hyvin yhteen keskikuoren ekshumaationopeusarvioiden kanssa, joka on ollut plutonien synnyn aikaan 1,3-2,7 mm/v (Nikkilä 2016).

Analoginen mallinnus antoi viitteitä siitä, miten laajalla alueella poimuvuoriston romahdus voi vaikuttaa. Tämän tiedon valossa KSGK:n alueelta saatuja tuloksia, kuten deformaation ikää, voidaan tietyissä rajoissa soveltaa läpi orogeenin. Vaikka analoginen mallinnus osoittautui oivalliseksi menetelmäksi kuoren kehityksen tutkimuksessa, silläkin on puutteensa. Monet asiat vaativat yksinkertaistamista, ja pikkutarkkojen piirteiden arviointi ei ole mahdollista. Tektonisia tapahtumia mallinnettaessa kaivataan kuitenkin juuri viitteitä siitä, mitä olisi voinut suuressa mittakaavassa tapahtua ja mitkä tapahtumat ovat epätodennäköisiä. Näihin analoginen mallinnus antoi vastauksen. Svekofennisen orogenian tutkimuksessa analogista mallinnusta kannattaisi käyttää jatkossakin, etenkin kun halutaan testata uusia hypoteeseja.

KAISA NIKKILÄ

Geotieteiden ja maantieteen laitos PL 64 00014 Helsingin yliopisto kaisa.nikkila@helsinki.fi

Kirjoittaja puolusti syyskuussa 2016 väitöskirjaansa analogisesta mallintamisesta ja Keski-Suomen granitoidikompleksin rakenteesta. Väitöskirja on luettavissa Åbo Akademin sivuilta: http://www.doria.fi/ handle/10024/125123?locale=lfi

Summary:

Crustal research with Play Doh

Our knowledge of the crustal structure of the Precambrian Svecofennian orogen has been enhanced during the last decade (Fig. 1). Much of the new knowledge is due to the deep seismic reflection studies (Finnish Reflection Experiments, FIRE), which transect the main lithological units and tectonic boundaries down to 100-km depth (Fig. 2; Kukkonen *et al.* 2006). While the tectonic events and processes represented in the Finnish bedrock and the anomalies seen in the FIRE profiles cannot be directly defined, the involved processes can however be studied by analog modeling.

Previous studies have suggested postaccretional extension, caused by gravitational spreading in the Central Finland granitoid complex (Fig. 3; e.g. Lahtinen *et al.* 2005). In the analog modeling (Fig. 4) some assumptions were made: the crust was thick, consisted of three layers and the weakest layer was in the middle (Nikkilä *et al.* 2009, 2015), like in a camembert cheese.

The analog modeling showed that a gravitational spreading will be distributed across the orogenic belt and will not concentrate only in the core area of the extension (Nikkilä *et al.* 2015). This means that e.g. coeval deformation could be found on both sides of the Raahe–Ladoga shear complex. In the Central Finland granitoid complex the deformation took place around 1.88–1.86 Ga, which can indicate that also the Eastern part of the orogen suffered coeval deformation (Nikkilä *et al.* 2016).

Analog modeling seems a practical tool also in modeling tectonic evolution of an ancient orogen. Like in any type of modeling some simplifications were made. However, despite these simplifications analog modeling can be used to test the plausibility of specific tectonic evolution scenarios.

The author defended her dissertation in September 2016 at the Åbo Akademi University. The dissertation is available at: http:// www.doria.fi/handle/10024/125123?locale=lfi

Kirjallisuus

- Gaál, G., 1990. Tectonic styles of Early Proterozoic ore deposition in the Fennoscandian Shield. Precambrian Research 46:83–114.
- Grad, M., Tiira, T. ja ESC Working Group, 2009. The Moho depth map of the European Plate. Geophysical Journal International 176:279–292.
- Hietanen, A., 1975. Generation of potassium-poor magmas in the northern Sierra Nevada and the Svecofennian in Finland. Journal of Research of the U.S. Geological Survey 3:631–645.
- Korja, A., Korja, T., Luosto, U. ja Heikkinen, P., 1993. Seismic and geoelectric evidence for collisional and extensional events in the Fennoscandian Shield implications for Precambrian crustal evolution. Tectonophysics 219:129–152.
- Korja, A., Kosunen, P. ja Heikkinen, P., 2009. A case study of lateral spreading: the Precambrian Svecofennian Orogen. Geological Society of London,

Special Publication 321:225-251.

- Kukkonen, I.T., Heikkinen, P., Ekdahl, E., Hjelt, S., Yliniemi, J., Jalkanen, E., *et al.*, 2006. Acquisition and geophysical characteristics of reflection seismic data on FIRE transects, Fennoscandian Shield. Special Paper – Geological Survey of Finland 43:13– 30.
- Kukkonen, I.T., Kuusisto, M., Lehtonen, M. ja Peltonen, P., 2008. Delamination of eclogitized lower crust: control on the crust–mantle boundary in the central Fennoscandian shield. Tectonophysics 457:111–127
- Lahtinen, R., 1994. Crustal evolution of the Svecofennian and Karelian domains during 2.1–1.79 Ga, with special emphasis on the geochemistry and origin of 1.93–1.91 Ga gneissic tonalites and associated supracrustal rocks in the Rautalampi area, central Finland. Geological Survey of Finland, Bulletin 378:1–128.
- Lahtinen, R., Korja, A. ja Nironen, M., 2005. Paleoproterozoic tectonic evolution. Developments in Precambrian Geology 14:481–531.
- Lahtinen, R., Huhma, H., Lahaye, Y., Lode, S., Heinonen, S., Sayab, M., *et al.*, 2016. Paleoproterozoic magmatism across the Archean-Proterozoic boundary in central Fennoscandia: Geochronology, geochemistry and isotopic data (Sm-Nd, Lu-Hf, O). Lithos 262:507–525.
- Nemčok, M., Mora, A. ja Cosgrove, J., 2013. Thickskin-dominated orogens; from initial inversion to full accretion: an introduction. Geological Society of London, Special Publication 377:1–17.
- Nikkilä, K., 2016. Analog Models of the Lateral Spreading of a thick three-layer crust: implications for the Svecofennian orogen in Finland. Akateeminen väitöskirja, Åbo Akademi.
- Nikkilä, K., Roy Chowdhury, B.S., Dietl, C., Korja, A., Eklund, O. ja Zanella, F., 2009. Thermomechanical analogue modelling of the extensional collapse of a collisional orogeny the Svecofennian orogen, Finland. Geotectonic Research 96:21–38.
- Nikkilä, K., Korja, A., Koyi, H. ja Eklund, O., 2015. Analog modeling of oneway gravitational spreading of hot orogens – A case study from the Svecofennian orogen, Fennoscandian Shield. Precambrian Research 268:135–152.
- Nikkilä, K., Mänttäri, I., Nironen, M., Eklund, O. ja Korja, A., 2016. Three stages to form a large batholith after terrane accretion – An example from the Svecofennian orogen. Precambrian Research 281:618–638.
- Nironen, M., 2003. Keski-Suomen Granitoidikompleksi: Karttaselitys. Geologian tutkimuskeskus, Espoo.

- Rey, P., Vanderhaeghe, O. ja Teyssier, C., 2001. Gravitational collapse of the continental crust: definition, regimes and modes. Tectonophysics 342:435–449.
- Sorjonen-Ward, P., 2006. Geological and structural framework and preliminary interpretation of the FIRE 3 and FIRE 3A reflection seismic profiles, central Finland. Special Paper – Geological Survey of Finland 43:105–159.

Maankuoren painovoimainen romahtaminen

Vuorijonopoimutuksessa maankuori paksuuntuu jopa 70 km paksuiseksi. Paksuuntunut kuori voi olla epätasapainossa verrattuna sen lähialueilla olevan ohuemman kuoren alueeseen. Epätasapainossa oleva kuori pyrkii takaisin tasapainotilaan siirtämällä ainesta paksuimmasta kohdasta ohuemman kuoren alueelle. Tätä prosessia kutsutaan kuoren romahtamiseksi. Kuoren romahtaminen aiheuttaa ekstensiota joko pelkän yläkuoren alueella tai koko kuoressa.

Analoginen mallinnus

Analoginen mallinnus on menetelmä, jolla pyritään mallintamaan luonnon ilmiöitä. Analogiset mallit ovat aina pienoismalleja. Geologiassa pienoismalleilla halutaan jäljentää tektonisia tapahtumia kuten poimutuksen syntyä. Pienoismallien teossa käytetään yleensä perusmateriaalina hiekkaa, silikonia ja muovailuvahaa.