

# Milloin laattatektoniikka alkoi?

## Penrose-kokous 13.–18.6. 2006, Lander, Wyoming, USA

PETRI PELTONEN, ANNAKAISA KORJA JA PEKKA HEIKKINEN

### Taustaa

Kesäkuussa kokoontui Landerin pikkukaupunkiin, Kalliovuorten itäreunalle, Yellowstonen ja Tetonin komeiden kansallispuistojen kupeeseen, noin 60 geologia ja geofyysikkoo pohtimaan milloin maapalloa muokkaava laattatektoniikka nykyisessä muodossaan käynnistyi (katso myös Witze 2006). Kokouksen kutsuivat koolle ja sitä isännöivät Kent Condie (New Mexico Institute of Mining and Technology), Alfred Kröner (University of Mainz) ja Robert J. Stern (University of Texas). Esitelmää pidettiin kolmena päivänä (ja iltana) Pronghorn Lodge -motellin kokoussalissa, jossa myös ruokailtiin ja vietettiin iltaa, joten yhdessäolo oli tiivistä. Suuri osa osallistujista oli yhdysvaltalaisia tai kanadalaisia, mutta joukkoon mahtui myös tutkijoita Australiasta, Etelä-Afrikasta, Saksasta, Brasiliasta, Kiinasta, Japanista,

Israelista, Omanista sekä Ruotsista ja Suomesta – tämän maaottelun Suomi voitti osallistujin 3–2. Kokouspäivien välillä käytiin kahtena päivänä maastossa. Ensimmäinen ekskursio suuntautui arkeiselle South Pass -vihreäkivivyöhykkeelle ja toinen arkeiselle Oregon Trail törmäysvyöhykkeelle.

Alkusysäys kokouksen järjestämiseksi tuli Robert J. Sternin vuonna 2005 *Geology*-lehdessä ilmestyneestä artikkelista ”*Evidence from ophiolites, blueschists, and ultrahigh-pressure metamorphic terranes that the modern edisod of subduction tectonics began in Neoproterozoic time*”. Tässä provokatiivisessa jutussa ”Bob” Stern esitti, että koska ofoliitteja, siniliuskeita (blueschists) ja ultrakorkean paineen metamorfisia vyöhykkeitä ei tavata nuoremmilla orogeniavyöhykkeillä, laattatektoniikka käynnistyi vasta aikaisintaan 1000



Kuva 1. Kokous pidettiin Wyomingin osavaltiossa – intiaanien ja lehmipoikien maassa.

miljoonaa vuotta sitten. Tarkkaan ottaen muutamia varhaisproterotsooisia ofoliitteja kyllä tunnetaan, kuten Kainuun liuskejaksen Jormua, mutta nämä ovat Sternin mielestä todistusarvoltaan vähäisiä. Toinen argumentti oli myös epäsuora: koska tärkein mannerlaattoja liikuttava prosessi on kylmien merellisten laattojen subduktion aiheuttama ”veto”, ei laattatektoniikka ole voinut käynnistyä ennen kuin maapallo oli riittävästi jäähtynyt noin miljardi vuotta sitten. Maapallon varhaishistoriassa merenkuori siis oli ehkä liian paksu ja lämmin subduktoituaakseen ja joskus tulevaisuudessa laattatektoniikka puolestaan pysähtyy maapallon jäähtymisen seurauksena, koska maan vaippa ei enää sula valtamerten keskiselänteillä, eikä uutta merellistä litosfääriä siten enää muodostu. Elämme siis väli-vaihetta, subduktio-tektoniikan aikakautta.

## Kokousuutisia

Ensimmäinen päivä alkoi sarjalla kutsuesityksiä, joissa pohdittiin käynnistykö laattatektoniikka neoproterotsooisena (Stern), paleoproterotsooisena (Bleeker), myöhäisarkeeisena (Condie), varhaisar-

keeisena (Smithies) vai peräti jo haadeisena aikana (Harrison). Käsitykset poikkeavat toisistaan siis lähes 3500 miljoonaa vuotta! Poimin tähän vain muutamia ”kohokohtia” esityksistä ja vilkkaasti polveilleesta keskustelusta.

Jonkin verran sekaannusta aiheuttaa laattatektoniikan selkeän määritelmän puuttuminen. Mitä vaaditaan, jotta edes suurin piirtein nykyisen kaltaisen laattatektoniikan voidaan osoittaa toimineen kaukana menneisyydessä? Vaaditaanko säilyneitä korkean paineen kiviä ja ofoliitteja, vai riittääkö vaikkapa se, että voidaan geokemiallisin menetelmin osoittaa joidenkin arkeisten vulkaniittien olevan samanlaisia kuin nykyiset saarikaaribasaltit. Entä onko paleomagneettinen todiste mantereiden keskinäisistä liikkeistä riittävä todiste, tai onko arkeisten merenkuoren kappaleiden (vaipan eklogiitit) olemassaolo litosfäärivaipan juuriosissa yli 200 kilometrin syvyydessä osoitus subduktiosta?

Wouter Bleeker – tunnettu arkeekumin tutkija – Kanadan geologisesta tutkimuslaitoksesta tuli esityksessään johtopäätökseen, että laattatektoniikka alkoi jo huomattavasti aikaisemmin, mutta nykyisen kaltaisena ja nykyisessä mittakaavassa



Kuva 2. Kokouksen osallistujat kenttäretkellä tutustumassa mesoarkeiseen Sacawee-pohjagneisiin ja sen neoarkeisiin suprakrustisiin peitteisiin. Oppaana B. Donald Frost Wyomingin yliopistosta.



Kuva 3. Keskustelua kokoussalissa. Vasemmalla Kent Condie, mikrofonia pitelee geofysikko Ronald M. Glowes.

käynnistyi vasta paleoproterotsooisena aikana. Tämän ikäisistä laattojen repeämisistä ja törmäyksistä onkin runsaasti sekä paleomagneettista ja geologista todistusaineistoa (kuten ofoliitteja). Kent Condie puolestaan tarkasteli esityksessään myöhäisarkeista aikaa. Arkeisia ofoliitteja ei tunneta (palaan tähän tärkeään asiaan vielä tuonnempana), mutta muutoin tältä ajalta tunnetaan vihreäkivi-vyöhykkeitä, jotka suuresti muistuttavat merellisiä laakiobasalteja (oceanic plateaus) ja saarikaaria. Condien mielestä jonkinlainen laattatektoniikka on toiminut maapallolla magmamerivaiheesta lähtien (n. 4.4 Ga), mutta nykyaikainen laattatektoniikka käynnistyi ”vasta” myöhäisarkeisena aikana noin 3 miljardia vuotta sitten.

Paljon keskustelua synnytti niin kutsuttujen Jack Hills -zirkonien alkuperä. Vanhimmat Yilgarn-kraatonin alueelta, Jack Hillsin sedimenteistä Länsi-Australiassa tavatut detritaaliset zirkonikiteet ovat iältään 4.4 miljardia vuotta ja siten kiteytyneet vain noin 160 miljoonaa vuotta maapallon tiivistymisen jälkeen. Australialaiset tukijat Simon Wilde

ja Mark Harrison väittävät mm. näiden zirkonien happi- ja hafnium-isotooppikoostumuksen osoittavan että zirkonit ovat peräisin mantereisesta graniittisesta kuoresta, joka syntyi sedimenttien sulamisen tuloksena, ja siten olevan epäsuorasti todisteena laattatektonisista prosesseista. On kuitenkin epävarmaa, ovatko nämä muutamit zirkonit todellakin osoituksena jo 4.4 syntyneestä mantereisestä kuoresta – voisivathan ne olla lähtöisin vaikka Kuusta ja Marsista peräisin olevasta meteoriitista (zirconejahan on löydetty vain muutama), tai vaikkapa valtameren keskiselänteillä kiteytyneistä plagiograniteista.

Iltapäivällä kuulumme joukon esityksiä siitä, miten maapallon terminen tila ja sen ajan myötä tapahtuva jäähtyminen vaikuttavat litosfäärilaattojen rheologisiin ominaisuuksiin ja siten kontrolloivat laattatektonisia prosesseja. Paul Silver esitti, että maapallolla kilpailisi kaksi erilaista tektonista tilaa: subduktio ja ”Stagnant lid” (pysähtynyt kansi). Nykyinen laattatektoniikka olisi subduktiotion mukaista, missä subduktiovyöhykkeiden yhteis-





Kuva 4. Harvinainen näky: vuoristo arkeeisista kivistä! Nuori siirrostektoniikka on kohottanut Grand Teton -vuoriston vain muutama miljoona vuotta sitten. Korkeuseroa huipulta laakson pohjalle voi kertyä jopa kolme kilometriä.

pituus olisi vakio ja subduktiovyöhyke syntyy tarvittaessa lähenevien laattojen reunalle. ”Stagnant lid”-tilaan maapallo siirtyisi pikku hiljaa kun joko subduktiolutot tai törmäykset lopettaisivat subduktioprosessin esim. supermantereen syntyessä. Toisaalta Stagnant lid -tilassa lämmön haihtuminen paikallaan pysyvän litosfäärin läpi avaruuteen on suhteellisen heikkoa ja siksi lämpöenergian kertyminen esim. supermantereen alle aiheuttaisi vaipan lämpötilan nousua, sulamista. Näin konvektio enemmän tai myöhemmin aiheuttaisi supermantereiden hajoamisen ja subduktion uudelleenkäynnistymisen.

Paul Morgan puolestaan esitti, että maapallon varhaishistoriassa litosfäärin suuren sisäisen lämmöntuoton vuoksi kuori ei kyennyt vastustamaan leviämistä aiheuttavia jännitystä ja tästä syystä kaikki yli 4 Ga vuotta vanhemmat maankuoren kappaleet olisivat joutuneet uudelleen kierrätetyiksi. Haadeisen ajan vaihduessa arkeiseksi, lämpötila olisi laskenut riittävästi kuoren säilymiseksi. Jäähdytymisen edistyessä ja arkeisen kauden vaihduessa-

sa proterotsooiseksi kuori kykeni vahventumaan 30 km paksuiseksi. Jeroen van Huenen puolestaan esitti, että koska arkeinen maa oli lämpimämpi, niin subduktio ei ollut mahdollinen alas painuvan merellisen laatan heikon kestävyuden takia niiden katketessa ennen aikojaan. Toisen ongelman aiheutti suuremmasta sulamisasteesta johtuva suuri magmamäärä ja paksu maankuori, joka olisi ollut esim. proterotsooista kuorta kelluvampi ja siksi heikommin subduktoituva.

Paleomagnetismin tutkijat Sergei Pisarevsky (University of Western Australia) ja David Evans (Yale University) totesivat että selkeät paleomagnetiset todisteet laattojen suhteellisista liikkeistä ovat korkeintaan noin 2 miljardin vuoden takaa – tätä vanhempiakin remanensseja on mitattu, mutta ne ovat yleensä heikkoja ja tulkinnanvaraisia.

Toisena päivänä suuntasimme päiväretkelle Wyoming-provinssiin kuuluvalla South Pass -vihreäkivivyöhykkeelle. South Pass on suurimpia ja parhaiten säilyneitä Wyoming-provinssin arkeisia vihreäkivivyöhykkeitä. Se on tulkittu

juveniiliseksi vyöhykkeeksi joka on muodostunut nykyisen kaltaisen akreetio-tektoniikan tuloksena. Se on myös ollut tärkeä kulta- ja rautamalmin tuotantoalue. Päivän aikana tutustuimme erilaisiin arkeisiin suprakrustisiin kivilajeihin grauvakoista komatiitteihin sekä magmaattisesti kerroksellisiin ja deformatiivisiin granitoidi-intruusioihin.

Kolmas päivä alkoi sarjalla geokemiallisia alustuksia. Julian Pearce (Cardiff University) esitteli jo tutuksi käyneiden geokemiallisten diagrammiensa soveltuvuutta arkeisten vulkaniittien tutkimuksessa. Erilaiset subduktioprosessit muodostavat luonteenomaiset trendsä esimerkiksi Th/Yb vs. Nb/Yb -diagramilla, eikä Pearcen mielestä ole syytä olettaa miksei tämä toimisi arkeisten basalttienkin kohdalla. Potentiaalinen ongelma geokemiallisissa tutkimuksissa on tietysti muuttuminen, sekä seikka, että sekä subduktio että kuoren kontaminaatio aiheuttavat samantyyppiset trendit diagrammeille – joka tapauksessa esim. korkea Th/Yb arkeisissa magmoissa osoittaa niitä vanhemman felsisen kuoren olemassaoloa.

Steven Shirey (Carnegie Institute of Washington) kertoi uusimmista isotooppi-geologisista tuloksista. Litosfäärisestä vaipasta peräisin olevien eklogiittiksenoliittien ja eklogiittisten timanttien alkuperä on kiehtova kysymys. Kimberliittimagmojen mukaan suomien eklogiittiksenoliittien tutkimukset osoittavat että niiden happi-isotooppikoostumus poikkeaa selkeästi maan vaipalle luonteenomaisista arvoista. Eklogiittien happi voi olla joko sitä raskaampaa tai kevyempää. Samanlaista vaihtelua on todettu merellisessä kuoressa, jonka hydroterminen muuttuminen johtaa sen happi-isotooppikoostumuksen muuttumiseen. Kun vielä eklogiittisten timanttien hiili-isotooppikoostumus viittaa niiden hiilen biogeeniseen alkuperään, ei ole ihme että litosfääri-vaipan eklogiitteja pidetään arkeisen merenpohjan kappaleina, jotka ovat vajonneet litosfääriin juuriosiin aina timantin pysyvyysalueelle asti. Kokonaan toinen kysymys onkin, että onko tämä arkeisen merenpohjan kiertäminen osoituksena nykyisen kaltaisesta subduktio-tektoniikasta. Toinen mahdollisuus olisi tiheyseroista johtuva eklogiittitunee merellisen ja mantereisen alakuoren vajoaminen kevyempään litosfääri-vaippaan.

Kiinnostavan esityksen tarjosi myös Guochun Zhao (University of Hong Kong), joka esitti vakuuttavan uudelleentulkinnan maailman van- GEOLOGI 58 (2006)

himpana pidetyn Dongwanzi-ofioliitin iästä. Alkuperäinen kuvaus Dongwanzi-ofioliitista ilmestyi *Science*-lehdessä 2001 (Kusky *et al.* 2001), jossa Dongwanzi-ofioliitin iäksi raportoitiin gabbroista saatu U-Pb zirkoni-ikä 2505 miljoonaa vuotta. Asiasta heräsi kuitenkin keskustelua jo helmikuussa 2002 (Zhai *et al.* 2002), kun joukko kiinalaisia tutkijoita epäili Dongwanzin alkuperää. Ofioliittitulkinnan kannalta olennainen ultramafinen yksikkö ei sisälläkään lainkaan ultramafisia vaipan residuaalisia peridotiitteja, vaan ainoastaan erilaisia kerrosrakenteisia magmakiviä, jotka jo vanhoilla kiinalaisilla kallioperäkartoilla oli merkitty iältään mesotsooisiksi. Suorat ikämääritykset kuitenkin vielä tuolloin puuttuivat. Penrose-kokouksessa Guochung esitteli uusia zirkoni-ikä ”ultramafisen” yksikön hornblendiiteista ja gabbroista. Lukuisat määritykset antoivat ultramafisen yksikön iäksi vain noin 300 miljoonaa vuotta! Suomalaisille tämä oli hyvä uutinen; onhan Jormuan ofioliitti edelleen maailman vanhin täysin säilynyt ofioliitti. Esitelmämme Jormuasta (Peltonen ja Kontinen) herätti myönteistä kiinnostusta. Jormuan mafinen ultramafinen magmaattinen kompleksitunnistettiin ofioliitiksi jo kaksikymmentä vuotta sitten (Kontinen 1987). Viime vuosina erityisesti Jormuan ultramafista yksikköä (pääasiassa residuaalisia vaipan peridotiitteja) on tutkittu tarkemmin, mikä on johtanut Jormuan geotektonisen aseman uudelleenarviointiin. Nykytulkinnan mukaan Jormuan ofioliitti on nk. transitionaalinen ofioliitti, joka edustaa mantereisen ja merellisen litosfääriin vaihtumavyöhykettä noin 2 miljardia vuotta sitten syntyneessä passiivisessä mannerreunassa (Peltonen ja Kontinen 2004). Vaikka Jormuan olemassaolo on kiistaton osoitus uuden merenpohjan synnystä ja laattojen keskinäisestä liikkeestä, ei tämäkään riittänyt vakuuttamaan Robert Sterniä laattatektoniikan käynnistymisestä näinkään aikaisin maapallon historiassa. Sternin vaihtoehtoinen selitys on, että laattatektoniikka on käynnistynyt ja pysähtynyt useita kertoja maapallon historiassa – Jormua ja muut varhaisproterotsooiset ofioliitit olisivat siten osoituksena vain tällaisesta välivaiheesta, ennen kuin nykyinen subduktio-tektoniikka käynnistyi 1000 miljoonaa vuotta sitten!

Kokouksen hännänhuippuna seismologit esittelivät omia havaintojaan arkeisesta ja proterotsooisesta tektoniikasta. Kanadalaiset Ron Clowes

ja Arie Van der Velden esittelivät LITHOPROBE-ohjelman ja Annakaisa Korja ja Pekka Heikkinen FIRE- ja BABEL-luotausten tuloksia, joiden perusteella kuoren rakenteet ovat samankaltaisia niin nuorilla kuin vanhoillakin alueilla. Ainoana poikkeuksena on kratonisten kilpialueiden litosfääriin suuri paksuus ja suuri seisminen nopeus. Geologeja ilahdutti erityisesti FIRE-aineiston yläkuoren hyvä erotuskyky sekä sen mahdollistama hyvä korreloituvuus kallioperän rakenteisiin ja litologiseen vaihteluun.

Geofyysikot päättelivät, että koska arkeoisella ja proterotsooisella ajalla syntyneet seismiset rakenteet näyttävät samanlaisilta kuin nykyisin syntyvät rakenteet, ne ovat myös syntyneet samanlaisissa fysikaalisissa olosuhteissa ja prosesseissa, sillä fysiikan lait ovat pysyviä. Tällä perusteella BABEL- ja FIRE-linjoilta on tunnistettu repeämä-, subduktio- törmäys- ja transformi-siirorakenteita (Korja ja Heikkinen 2005, Lahtinen *et al.* 2005). Korja esitti lisäksi, että laattatektoninen tyyli vaihtui paleoproterotsooisena ajan alun minilaattojen tektoniikasta nykyisen kaltaiseen isojen mannerlaattojen tektoniikkaan n. 1800 Ma sitten, jolloin Hudsonian superman-ner oli saatu koottua. Tämän jälkeen nykyisen kaltainen Wilsonin-sykli alkoi toimia ainakin Pohjois-Euroopassa.

## Epilogi

Kokouksen lopuksi äänestimme milloin laattatektoniikka käynnistyi: eniten ääniä sai vaihtoehto ”3–4 miljardia vuotta sitten”, joka sai 28 eli lähes puolet äänistä. Kokous tarjosi kiinnostavan läpileikkauksen maapallon varhais historian tutkimukseen. Esitetyt ajatukset tarjosivat myös tieteenfilosofista pohdittavaa. Geologisen tutkimuksen ohjenuoranahan on jo 1800-luvulta lähtien ollut uniformitarismi – se, että planeettamme toimii muuttumattomien luonnonlakien ohjaamana, ja että nykyisyys on menneisyyden avain. Mutta miten sitten tutkia ja kuvaila varhaisinta maapalloa ilman laattatektoniikkaa, samalla kun laattatektoniikka – geologian suuri yhtenäisteoria – ohjaa nykyistä maailmankuvaamme ja selittää lähes kaiken.

Kokouksen esitelmät ovat ladattavissa Power Point -muodossa Teksasin yliopiston sivuilta 180

osoitteesta: <http://www.utdallas.edu/~dxt038000/Plate%20Tectonics/presentations.htm>

## Kirjallisuus:

- Kontinen, A. 1987. An Early proterozoic ophiolite – the Jormua mafic-ultramafic complex, northeastern Finland. *Precambrian Research* 35:313–341.
- Korja, A. ja Heikkinen, P. 2005. The Accretionary Svecofennian Orogen-Insight from the BABEL profiles. *Precambrian Research* 136:241–268.
- Kusky, T.M., Li, J.-H. ja Tucker, R.D. 2001. The Archean Dongwanzi ophiolite complex, North China craton: 2.505-billion-year-old oceanic crust and mantle. *Science* 292:1142–1145.
- Lahtinen, R., Korja, A. ja Nironen, M. 2005. Palaeoproterozoic tectonic evolution. Teoksessa: Lehtinen, M., Nurmi, P.A. ja Rämö, O.T. (toim.) *The Precambrian Geology of Finland – Key to the Evolution of the Fennoscandian Shield*. Elsevier Science B.V, Amsterdam. s. 418–532.
- Peltonen, P. ja Kontinen, A. 2004. The Jormua Ophiolite: a mafic-ultramafic complex from an ancient ocean-continent transition zone. Teoksessa: Kusky, T.M. (toim.). *Precambrian Ophiolites and Related Rocks*. *Developments in Precambrian Geology* vol 13, Elsevier B.V. s. 35–71.
- Stern, R.J. 2005. Evidence from ophiolites, blueschists, and ultrahigh-pressure metamorphic terranes that the modern episode of subduction tectonics began in Neoproterozoic time. *Geology* 33:557–560.
- Witze, A. 2006. The start of the world as we know it. *Nature* 442:128–131.
- Zhai, M., Zhao, G. ja Zhang, Q. 2002. Is the Dongwanzi Complex and Archean ophiolite? *Science* 295:923.

**Petri Peltonen**

Geologian tutkimuskeskus  
02150 Espoo

**Annakaisa Korja**

Seismologian laitos  
00014 Helsingin yliopisto

**Pekka Heikkinen**

Seismologian laitos  
00014 Helsingin yliopisto  
GEOLOGI 58 (2006)