

# Kuuma debatti – vaipan pluumit tieteellisenä kiistanaiheena

JUSSI S. HEINONEN

“

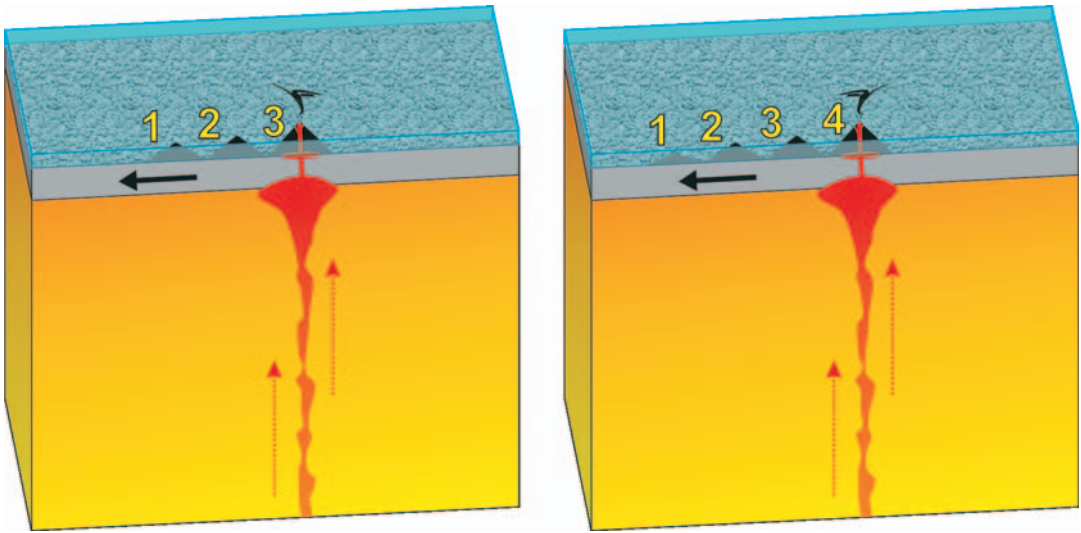
*En hetkeäkään epäillyt tiedon aitoutta – luotan edelleen tiedemiesten sanomisiin samalla tavalla kuin kirurgien ja putkimiesten ja kaikkien omaan alansa perehtyneiden kohdalla. Mutta yhtä asiaa en käsittänyt: Miten ihmeessä kukaan voi tietää, mitä on tuhansia maileja jalkojemme alla, minne kukaan ei ole nähnyt ja minne mitkään röntgensäteet eivät yllä? Minulle tämä tieto oli ihme.”*

Bill Bryson maapallon kehärakenteesta kirjassaan “Lyhyt historia lähes kaikesta” (Bryson 2003; kirjoittajan suomennos)

**M**enestyskirjailija Brysonin ihmettelemä tieto on saatu selville mittaamalla seismisten aaltojen etenemisnopeutta ja heijastumista maapallon sisällä. Kuitenkin, vaikka maapallon vaippa eli mantteli käsittää yli 80 % planeettamme tilavuudesta ja sen tutkimiseen on tarjolla monia muitakin keinoja, tieteellinen käsitys vaipan toiminnasta on edelleen varsin vajavainen. Siitä huolimatta mannerlaattojen keskiosissa esiintyvät vulkaaniset ilmiöt on jo 1970-luvulta lähtien yhdistetty usein vaipan epätavallisen kuumiin nousuvirtauksiin, joita kutsutaan pluumeiksi. Vuosituhannen vaihteessa pluumien olemassaoloa alettiin kuitenkin kyseenalaistaa enenevässä määrin ja osapuolten kuumentamassa ja edelleen jatkuvassa väittelyssä on noussut esiin varsin epätieteellisiäkin piirteitä.

## Pluumiteorian synty ja kehitys

Pluumien käsite esiteltiin ensimmäisen kerran vuonna 1971, kun Princetonin yliopiston geofysikko W. Jason Morgan yhdisti aikaisempia havaintoja ”kuumien pisteiden” tuottamista merellisten saarten tulivuoriketjuista ja mannerlaattojen liikkeistä (Morgan 1971). Tätä synteesiä käytetään edelleenkin vakioesimerkinä siitä, miten vaipan pluumien toiminta havaitaan maapallon pinnalla (Kuva 1). Artikkelissaan Morgan toteaa (kirjoittajan suomennos): ”*Olen esittänyt, että Havaiji-Emperor, Tuamotu-Line ja Austral-Gilbert-Marshall merellisten saarten ketjut voivat muodostua, kun jäykkä Tyynen Valtameren laatta liikkuu hitaasti yli kolmen paikallaan pysyvän kuumen pisteen [...] Ehdotan, että nämä kuumat pisteet ovat alavaipan konvektion ilmentymiä, jotka tuotta-*



Kuva 1. Malli merellisten saarten ja merenalaisten vuorijonojen synnystä litosfäärilaatan (harmaa) liikkuessa vaippapluumin ylitse.

Figure 1. A model for the generation of oceanic islands and seamount chains when a lithospheric plate (gray) moves over a mantle plume.

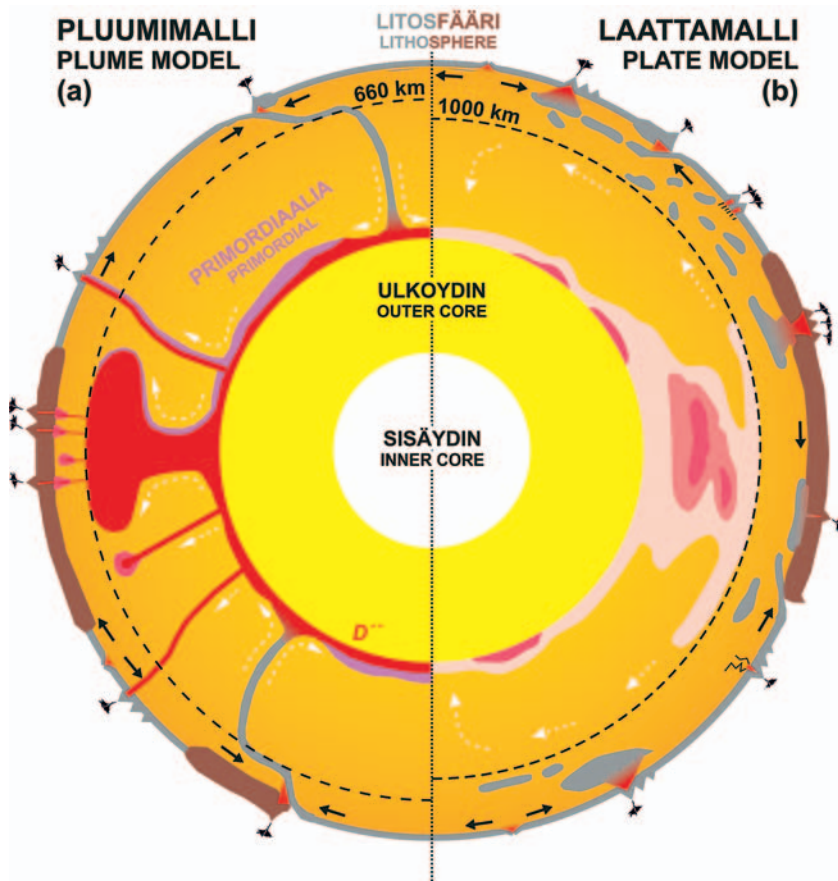
vat voiman mannerlaattojen liikkeelle.” Myöhemmin on selvinnyt, että mannerlaattojen liikkeen kannalta tärkein voima on alityöntövyöhykkeillä vaippaan sukeltavaan laattaan kohdistuva veto (”slab pull”), mutta pluumin peruskonsepti on säilynyt muuten pitkälti samanlaisena.

Kymmenisen vuotta pluumiteorian ensiaskeleiden jälkeen Hofmann ja White (1982) ehdottivat ratkaisua merellisten saarten laavakivien huomattavalle geokemialliselle monimuotoisuudelle: alityöntövyöhykkeiltä syväälle vaippaan, mahdollisesti aina ytimen rajapinnalle saakka uponneet kuoren kappaleet tempautuvat pluumien kyytiin ja tuottavat ylävaipassa sulaessaan kemiallisesti hyvin monimuotoisia sulia (Kuva 2a). Vaipan uumeniin on arvioitu olevan hautautuneena myös pian maapallon muodostumisen jälkeen eriytyneitä ”primordiaalisia” osia, joista olisivat peräisin joidenkin merellisten saarten laavojen epätavallisen korkeat, pääasiassa nukleosynteesissä syntyneen,  $^3\text{He}$ :n pitoisuudet  $^4\text{He}$ :n suhteen

(Kurz *et al.* 1982). Myös valtavat esihistorialliset laakiobasalttipurkaukset on yhdistetty kuumiin pisteisiin ja vaipan pluumeihin (esim. Richards *et al.* 1989): esimerkiksi Paraná-Etendekan laakiobasalttiprovinssi näyttää linkittyvän merenalaisten laavatasankojen ja vuorijonojen kautta Tristan da Cunhan tuliperäisen saaren alla lymyvään kuumen pisteeseen (Kuva 3). Yhä tarkemmat seismiset mittaukset paljastivat syväältä tulivuorisaitien alaisesta vaipasta kuumia alueita (esim. Shen *et al.* 1998), joissa seismiset aallot etenivät hitaammin. Samaiset aallot paljastivat myös ytimen ja vaipan rajapinnalta heterogeenisen  $D''$ -vyöhykkeen (Kuva 2a), mahdollisen ”mannerlaattojen hautausmaan”, joka sopi myös pluumin lähtöalustaksi (ks. Gurnis *et al.* 1998). Näin pluumit olivat vähitellen vakiinnuttaneet paikansa geotieteellisessä diskurssissa.

## Pluumien vastarintaliike

Pluumiteorian innoittamana geotieteilijät ympäri maailman alkoivat löytää merkkejä



Kuva 2. Maapallon vaipan "pluumimalli" (a) ja "laattamalli" (b) julkaisua Anderson (2005) mukailleen. Pluumimallissa ydin jäähtyy pluumitoiminnan kautta, laattamallissa ytimen jäähtyminen tapahtuu johtumalla. Selkeyden vuoksi litosfääriin suhteellista paksuutta on liioiteltu.

Figure 2. The "plume model" (a) and "plate model" (b) for the Earth's mantle modified after Anderson (2005). Core heat is removed by plumes in the plume model and conducted into mantle in the plate model. The thickness of the lithosphere has been exaggerated to preserve clarity.

pluumien toiminnasta. Pluumikortti tuntui olevan valttia myös silloin, kun muita selityksiä kaukana vulkanismin syntymekanismin kannalta suhteellisen hyvin tunnetuista keskiselänteistä ja alityöntövyöhykkeistä esiintyvälle tulivuoritoiminnalle ei löytynyt tai osattu pohdita. Esitettiin malleja kuolevista plumeista, vauvaplumeista, kylmistä plumeista ja pulsimaaisista plumeista: yhtäkkiä pluumien tuotoksia tuntui löytyvän kaikkialta. Erilaisten pluumimallien monipuolisuus ja helppo muunneltavuus havaintoja tukeviksi alkoi kui-

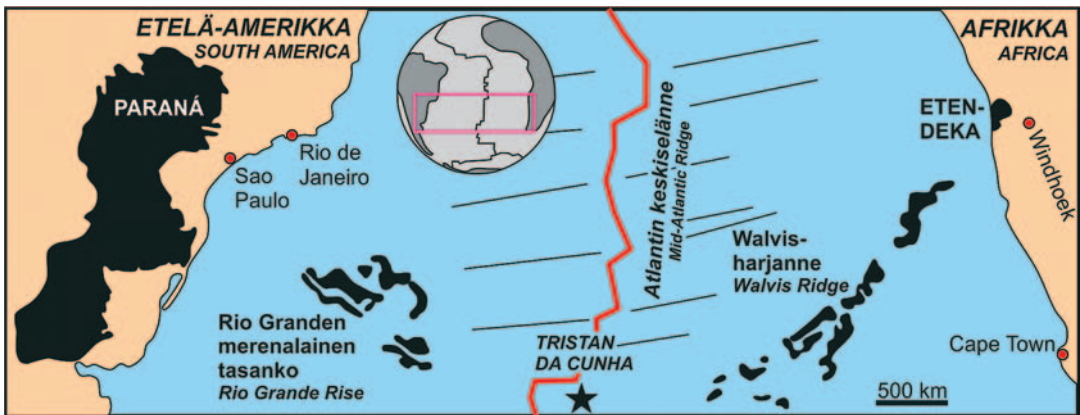
tenkin lopulta kääntyä pluumiteoriaa itseään vastaan.

Vuonna 2003 kävivät pluumiteorian kyseenalaistajat vastahyökkäykseen geotieteilijöiden Gillian R. Foulgerin ja Don L. Andersonin johdolla. Tällöin perustettiin Foulgerin ylläpitämä [www.mantleplumes.org](http://www.mantleplumes.org) -sivusto, joka kokoaa yhteen pluumien kanssa ristiriitaisia havaintoja ja artikkeleita. Lukuisilla kansallisilla ja kansainvälisillä palkinnoilla (mm. National Medal of Science) huomioitu Anderson tiivistä sivuston tehtävän seuraavasti

(www.mantleplumes.org; kirjoittajan suomenos): ”Vakuuttavia todisteita ytimen ja vaipan rajapinnalta nouseville pluumeille ei ole löytynyt, ja päinvastoin tulokset ovat usein odottamattomia. Toisaalta, on kerätty todisteita erilaisista matalalla lepäävistä ja laaja-alaisista anomaalisista vaipan osista. [...] Pluumille ei ole selkeää, laajalti hyväksyttyä kuvausta. Tämän seurauksena tieteellinen kanssakäynti kärsii siitä, että on epäselvää, mitä pluumilla missäkin asiayhteydessä tarkoitetaan, ja siten pluumia on käytännössä mahdoton todistaa vääräksi. MantlePlumes.org -sivusto tuo esille tätä ongelmaa ja siihen liittyviä kommentteja, kuvauksia ja tutkimuksia.” Tätä artikkelia kirjoitettaessa lähes 700 tutkijaa on kirjoittanut tiivistelmän tuloksistaan sivuille ja niillä on vierailtu yli 300 000 kertaa. Tärkeintä kritiikin uskottavuuden kannalta kuitenkin on, että useita pluumikriittisiä artikkeleita on julkaistu korkeatasoisissa tieteellisissä julkaisusarjoissa (mm. Anderson 2000, Foulger ja Natland 2003,

Anderson ja Natland 2007).

Monet pluumikriitikot eivät ainoastaan hyökänneet teorian nyansseja ja moniselitteisyyttä vastaan, vaan pluumit oltiin geologisena käsitteenä valmiita hautaamaan kokonaan. Voitaisiinko laattojen keskiosissa esiintyvä vulkanismi sittenkin selittää laattatektoniikan ja ylävaipan ominaisuuksien avulla (Kuva 2b; Anderson 1994, 2000, Foulger ja Natland 2003)? Merellisten saarten ja merenalaisen vuorijonojen geokemiallinen monimuotoisuus voisi johtua esimerkiksi ylävaipan metasomaatoosista (Pilet *et al.* 2005), korkeat <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He-suhteet <sup>4</sup>He-köyhtyneistä vaipan komponenteista (Anderson 1998) ja saarten muodostamat ketjut mannerlaattoihin kohdistuvan rasituksen aiheuttamista ”etenevistä” halkeamista (Stuart *et al.* 2007). Ovatko Paraná-Etendekan laakiobasalttiprovinssin Tristan da Cunhaan vulkaaniseen saareen yhdistävät merenalaiset tasangot ja vuorijonot sittenkin vain transformisiirosten ja sulaneiden litosfäärikappa-

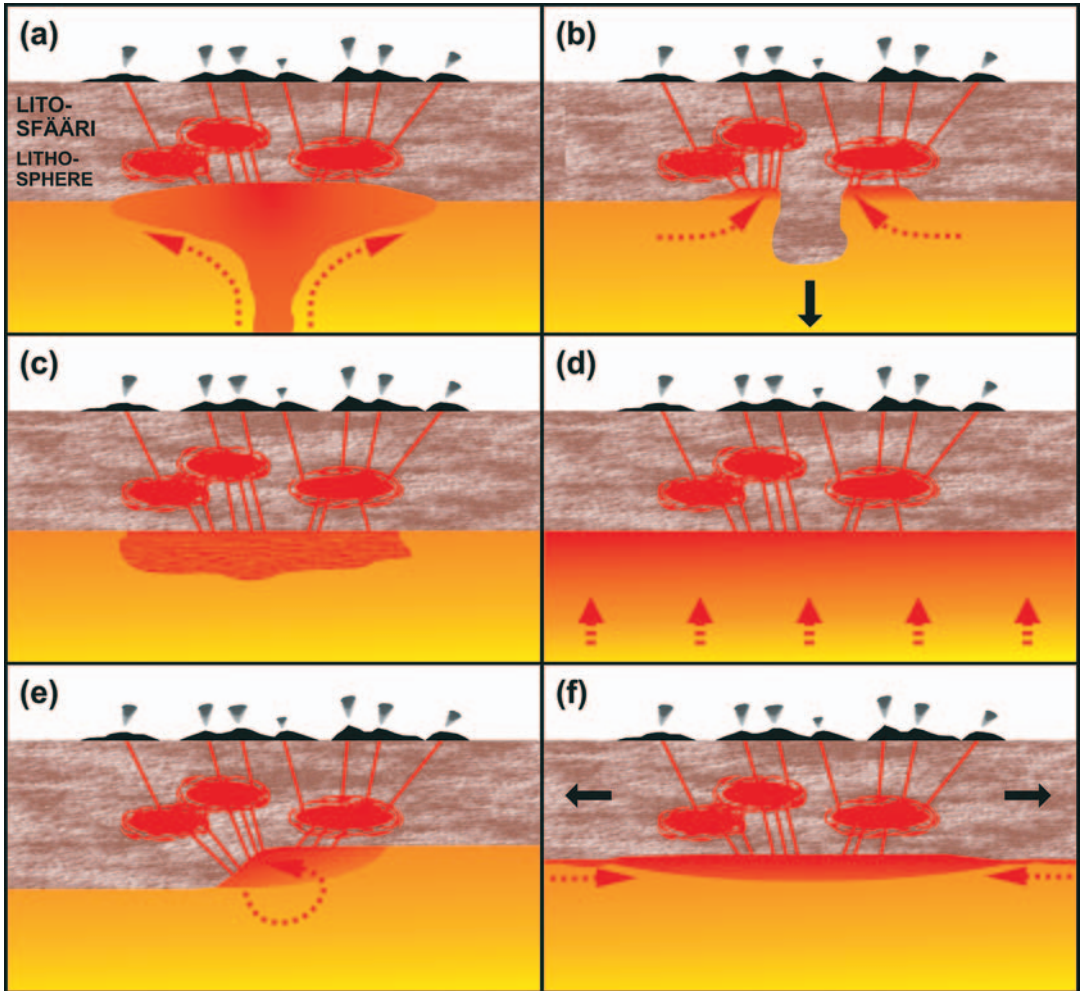


Kuva 3. Paraná-Etendekan laakiobasalttiprovinssi, Rio Granden merenalainen tasanko, Walvis-harjanne, Atlantin keskiselänne ja Tristan da Cunhaan tulivuorisaari kartalla esitettynä julkaisua Rocha-Júnior *et al.* (2012) mukailten. Pluumin mallin mukaan laakiobasaltit olisivat syntyneet pluumin leveästä ”päästä” ja merenalaiset basalttimuodostumat sekä Tristan da Cunha pluumin ohuesta ”hännästä”.

Figure 3. The locations of the Paraná-Etendeka flood basalt province, Rio Grande Rise, Walvis Ridge, Mid-Atlantic Ridge, and Tristan da Cunha oceanic island portrayed after Rocha-Júnior *et al.* (2012). The plume model suggests that the flood basalts were generated from the wide “head” of the plume whereas the underwater basalt formations and Tristan da Cunha were generated from the narrow “tail” of the plume.

leiden aiheuttamia (esim. Ussami *et al.* 2012; vrt. Kuva 3)? Itse laakiobasaltit voisivat muodostua esimerkiksi helpommin sulavista vaipan osista (Anderson 2007), litosfäärin delaminaatiossa (Elkins-Tanton ja Hager 2000) tai

termisesti eristävien supermantereiden aiheuttaman ylävaipan kuumenemisen seurauksena (Kuva 4) (Coltice *et al.* 2007). Seismisten aaltojen nopeuksien hitaat vyöhykkeet alavaipassa voidaan selittää termisten anomalioiden sijas-



Kuva 4. Erilaisia malleja laakiobasalttien synnylle: pluumimalli (a; esim. Richards *et al.* 1989), litosfäärin delaminaatio (b; Elkins-Tanton ja Hager 2000), fertiiliin vaipan sulaminen (c; Anderson 2007), termisesti eristävän supermantereiden aiheuttama ylävaipan lämpeneminen (d; Coltice *et al.* 2007), litosfäärin epä-jatkuvuuksien ohjaama konvektio (e; King ja Anderson 1998) ja pitkien ajanjaksojen kuluessa muodostuneiden ylävaipan sulien purkautuminen litosfäärin revetessä (f; Silver *et al.* 2006). Punainen väri indikoi sulanutta materiaalia.

*Figure 4. Variable models for the generation of continental flood basalts: plume model (a; e.g., Richards *et al.* 1989), lithospheric delamination (b; Elkins-Tanton and Hager 2000), melting of fertile mantle (c; Anderson 2007), supercontinent-induced insulation (d; Coltice *et al.* 2007), edge-driven convection (e; King and Anderson 1998), and stress-induced lithospheric fracturing and drainage of a relatively slowly accumulated magma reservoir (f; Silver *et al.* 2006). Red color indicates materials that are molten.*



ta myös koostumukseltaan poikkeavilla osuilla (Trampert *et al.* 2004).

## ”The Great Plume Debate”

Vaipan petrologiasta ja geofysiikasta kiinnostuneissa tutkijapiireissä alkoi esiintyä jakautumista ”pluumi-” ja ”laattaleireihin” (Kuva 2). Vuoden 2005 elo–syyskuussa järjestetyn ”The Great Plume Debate” -kokouksen Skotlannissa piti kerätä yhteen molempien leirien asiantuntijat ja saada aikaan jonkinlainen synteesi, joka miellyttäisi molempia osapuolia ja sivistäisi kansainvälistä tiedeyhteisöä. Vaan kuinka kävikään: yhteisymmärrykseen ei päästy, vaan kokouksen tuloksista koostettuun Chemical Geology -lehden teemanumeroon päätyi lopulta vain yksi pluumeihin kriittisesti suhtautuva artikkeli (Falloon *et al.* 2007) ja ”antipluumistit” päättivät julkaista omat synteesinsä pääasiassa Amerikan Geologisen Seuran (Geological Society of America) erikoisjulkaisuissa (Foulger *et al.* 2005; Foulger ja Jurdy 2007). Ajan henkeä kuvaa hyvin Elements-lehden suuria magmaprovinseja käsittelevä joulukuun 2005 teemanumero: vastakkaisia näkemyksiä esitelleet artikkelit ”Large Igneous Provinces and the Mantle Plume Hypothesis” (Campbell 2005) sekä ”Large Igneous Provinces, Delamination, and Fertile Mantle” (Anderson 2005) ovat lehdessä peräkkäin, mutta kummassakin jäävät vastapuolen argumentit lähes huomiotta.

Koska ”suuren pluumiväittelyn” annista ei saatu aikaan todellista yhteistä synteesiä, perinteisen linjan pluumiteoreetikot Ian Campbell ja Andrew Kerr totesivat oman käden oikeudella Chemical Geologyn teemanumeron pääkirjoituksessa seuraavasti (Campbell ja Kerr 2007: kirjoittajan suomennos): ”*Don Andersonin, Gillian Foulgerin ja muiden alkuperäinen kritiikki pluumiteoriaa kohtaan oli arvokasta. Se aiheutti sen, että pluumien kannattajat joutuivat uudelleenarvioimaan teoriaansa*

*testaamalla sen yhteensopivuutta havaintoihin ja tekemään uusia havaintoja alueilla, joista niitä puuttui. Todisteet vahvistavat nyt pluumiteorian sen kaikilta osin, kuten käy ilmi tästä teemanumerosta. Arvostelijat eivät onnistuneet esittämään vakuuttavaa kritiikkiä pluumiteoriaa vastaan viisipäiväisessä ”The Great Plume Debate” -kokouksessa. Oleellisinta on, että heillä ei ole esittää varteenotettavaa vaihtoehtoista hypoteesia.”* Foulger, Anderson ja kumppanit olivat luonnollisesti tästä hyvin eri mieltä ja kritiikki on edelleen jatkunut kiivaana sekä [www.mantleplumes.org](http://www.mantleplumes.org) -sivustolla että vertaisarvioituissa tieteellisissä julkaisusarjoissa (esim. Foulger ja Hamilton 2014). Joulukuun 2014 American Geophysical Unionin syyskokouksessa, joka kokoaa San Franciscoon n. 20 000 geotieteilijää, järjestetään Andersonin ja Foulgerin vetämä teemasessio nimeltään ”Theory of Earth”. Anderson pitää sessiossa pitkän ja ansiokkaan uransa tulokset yhteen kokoavan esitelmän ”The Last Word” – mielenkiintoista on nähdä, miten sessioon ja esitelmään kokouksessa suhtaudutaan.

## Pluumien tulevaisuus

Vaipan pluumeja ei voida koskaan suoraan havainnoida ja siksi niiden tulevaisuus onkin tutkijoiden käsissä. Pluumiväittelyä on jossain määrin värittänyt molempien osapuolten järeäpäisyys ja vastapuolen argumenttien huomiotta jättäminen. Tällainen ”debatti” harvoin johtaa suuriin tieteellisiin läpimurtoihin ja pikemminkin hidastaa tieteen kehitystä kohti yhä tarkempaa näkemystä maailmankaikkeuden prosesseista. Miksi monille erilaisille malleille laatansisäisen vulkanismin selittäjänä, pluumit mukaan lukien, ei voisi löytyä tilaa saman viitekehyksen eli maapallon alta (vrt. Koppers 2011)? Monet vaihtoehtoista malleista (Kuva 4) ovat varmasti tapauskohtaisesti vähintään yhtä varteenotettavia ja selittävät esimerkiksi Karoon suuren magmaprovinssin

tapauksessa joitakin alueellisia geologiaa, geofysikaalisia tai geokemiallisia piirteitä paljon paremmin kuin yksinkertainen pluumimalli (esim. Jourdan *et al.* 2005, 2007, Heinonen *et al.* 2010, 2014, Hastie *et al.* 2014). Siksi suosittelemme myös kotimaisille geotieteilijöille tutustumista vaihtoehtoihin malleihin ja käyttämään harkintaa ennen helpon pluumikorin pelaamista – maltti on valttia!

Artikkeli perustuu suurelta osin kirjoittajan Suomen Geologisen seuran kuukausikokouksessa 10.11.2011 pitämään esitelmään ”Nyt on kuumat paikat! – vaipan pluumien perustukset horjuvat”

## English summary

### *A hot debate – mantle plumes as a scientific bone of contention*

**M**antle plumes, emanating all the way from the lower mantle, were proposed as primary generators of intraplate magmatism already in the early 1970's. Earth scientists found significant amounts of supporting evidence for the mantle plume hypothesis during the 1980's and 1990's, and it became a widely accepted theory. Suddenly, plumes began to appear everywhere and they were considered as the most viable (and the most convenient) explanation for various forms of anomalous volcanism all around the world. This resulted in a backlash after the turn of the millennium, when the basics of the plume theory were strongly questioned, and alternative hypotheses presented, by a significant group of geoscientists led by Drs. Gillian R. Foulger and Don L. Anderson. The debate between the advocates and the opponents of the plume theory has been characterized by strong opinions and reluctance to reach a collective conclusion. Whereas mantle plumes may be responsible for some

intraplate volcanic features on Earth, they certainly are not an explanation to everything, and the author encourages Finnish geoscientists to think carefully before playing the plume trump card on a table of an anomalous volcanic phenomenon.

## Viitteet

- Anderson, D.L. 1994. The sublithospheric mantle as the source of continental flood basalts: the case against the continental lithosphere and plume head reservoirs. *Earth and Planetary Science Letters* 123:269–280.
- Anderson, D.L. 1998. The helium paradoxes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 95:4822–4827.
- Anderson, D.L. 2000. The thermal state of the upper mantle: no role for mantle plumes. *Geophysical Research Letters* 27:3623–3626.
- Anderson, D.L. 2005. Large igneous provinces, delamination, and fertile mantle. *Elements* 1:271–275.
- Anderson, D.L. 2005. Scoring hotspots: The plume and plate paradigms. Teoksessa: Foulger, G.R., Natland, J.H., Presnell, D.C. ja Anderson, D.L. (toim.). *Plates, Plumes, and Paradigms*. Geological Society of America Special Paper 388:31–54.
- Anderson, D.L. 2007. The eclogite engine: chemical geodynamics as a Galileo thermometer. Teoksessa: Foulger, G.R. ja Jurdy, D.M. (toim.). *Plates, Plumes, and Planetary Processes*. Geological Society of America Special Paper 430:47–64.
- Anderson, D.L. ja Natland, J.H. 2007. Evidence for mantle plumes? *Nature* 450:E15.
- Bryson, B. 2003. *A short history of nearly everything*. New York: Broadway Books, 688 s. (paperback).
- Campbell, I.H. 2005. Large Igneous Provinces and the Mantle Plume Hypothesis. *Elements* 1:265–269.
- Campbell, I.H. ja Kerr, A.C. 2007. The Great Plume Debate: Testing the plume theory. *Chemical Geology* 241:149–152.
- Coltice, N., Phillips, B.R., Bertrand, H., Ricard, Y. ja Rey, P. 2007. Global warming of the mantle at the origin of flood basalts over supercontinents. *Geology* 35:391–394.
- Elkins-Tanton, L.T. ja Hager, B.H. 2000. Melt intrusion as a trigger for lithospheric foundering and the eruption of the Siberian flood basalts. *Geophysical Research Letters* 27:3937–3940.
- Falloon, T.J., Danyushevsky, L.V., Ariskin, A., Green, D.H. ja Ford, C.E. 2007. The application of olivine

- geothermometry to infer crystallization temperatures of parental liquids: Implications for the temperature of MORB magmas. *Chemical Geology* 241:207–233.
- Foulger, G.R. ja Hamilton, W.B. 2014. Earth science: Plume hypothesis challenged. *Nature* 505:618.
- Foulger, G.R. ja Jurdy, D.M. (toim.). 2007. *Plates, Plumes and Planetary Processes*. Geological Society of America Special Paper 430, 997 s.
- Foulger, G.R. ja Natland, J.H. 2003. Is “Hotspot” Volcanism a Consequence of Plate Tectonics? *Science* 300:921–922.
- Foulger, G.R., Natland, J.H., Presnall, D.C. ja Anderson, D.L. (toim.). 2005. *Plates, Plumes, and Paradigms*. Geological Society of America Special Paper 388, 881 s.
- Gurnis, M., Wyssession, M.E., Knittle, E. ja Buffett, B.A. (toim.). 1998. *The Core-Mantle Boundary Region*. American Geophysical Union, Geodynamics Series, vol. 28, 334 s.
- Hastie, W.W., Watkeys, M.K. ja Aubourg, C. 2014. Magma flow in dyke swarms of the Karoo LIP: Implications for the mantle plume hypothesis. *Gondwana Research* 25:736–755.
- Heinonen, J.S., Carlson, R.W. ja Luttinen, A.V. 2010. Isotopic (Sr, Nd, Pb, and Os) composition of highly magnesian dikes of Vestfjella, western Dronning Maud Land, Antarctica: A key to the origins of the Jurassic Karoo large igneous province? *Chemical Geology* 277:227–244.
- Heinonen, J.S., Carlson, R.W., Riley, T.R., Luttinen, A.V. ja Horan, M.F. 2014. Subduction-modified oceanic crust mixed with a depleted mantle reservoir in the sources of the Karoo continental flood basalt province. *Earth and Planetary Science Letters* 394:229–241.
- Hofmann, A.W. ja White, W.M. 1982. Mantle plumes from ancient oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters* 57:421–436.
- Jourdan, F., Bertrand, H., Schaerer, U., Blichert-Toft, J., Féraud, G. ja Kampunzu, A.B. 2007. Major and trace element and Sr, Nd, Hf, and Pb isotope compositions of the Karoo large igneous province, Botswana-Zimbabwe: lithosphere vs mantle plume contribution. *Journal of Petrology* 48:1043–1077.
- Jourdan, F., Féraud, G., Bertrand, H., Kampunzu, A.B., Tshoso, G., Watkeys, M.K. ja Le Gall, B. 2005. Karoo large igneous province: Brevity, origin, and relation to mass extinction questioned by new  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age data. *Geology* 33:745–748.
- King, S.D. ja Anderson, D.L. 1998. Edge-driven convection. *Earth and Planetary Science Letters* 160:289–296.
- Koppers, A.A.P. 2011. Mantle plumes persevere. *Nature Geoscience* 4:816–817.
- Kurz, M.D., Jenkins, W.J. ja Hart, S.R. 1982. Helium isotopic systematics of oceanic islands and mantle heterogeneity. *Nature* 297:43–47.
- Morgan, W.J. 1971. Convection plumes in the lower mantle. *Nature* 230:42–43.
- Pilet, S., Baker, M.B. ja Stolper, E.M. 2008. Metasomatized lithosphere and the origin of alkaline lavas. *Science* 320:916–919.
- Richards, M.A., Duncan, R.A. ja Courtillot, V.E. 1989. Flood basalts and hot-spot tracks: plume heads and tails. *Science* 246:103–107.
- Rocha-Júnior, E.R.V., Puchtel, I.S., Marques, L.S., Walker, R.J., Machado, F.B., Nardy, A.J.R., Babinski ja M., Figueiredo, A.M.G. 2012. Re–Os isotope and highly siderophile element systematics of the Paraná continental flood basalts (Brazil). *Earth and Planetary Science Letters* 337–338:164–173.
- Shen, Y., Solomon, S.C., Bjarnason, I.T. ja Wolfe, C.J. 1998. Seismic evidence for a lower-mantle origin of the Iceland plume. *Nature* 395:62–65.
- Silver, P.G., Behn, M.D., Kelley, K.A., Schmitz, M. ja Savage, B. 2006. Understanding cratonic flood basalts. *Earth and Planetary Science Letters* 245:190–201.
- Stuart, W.D., Foulger, G.R. ja Barall, M. 2007. Propagation of the Hawaiian-Emperor volcano chain by Pacific plate cooling stress. *Teoksessa: Foulger, G.R. ja Jurdy, D.M. (toim.). Plates, Plumes, and Planetary Processes*. Geological Society of America Special Paper 430:497–506.
- Trampert, J., Deschamps, F., Resovsky, J. ja Yuen, D. 2004. Probabilistic Tomography Maps Chemical Heterogeneities Throughout the Lower Mantle. *Science* 306:853–856.
- Ussami, N., Chaves, C.A.M., Marques, L.S. ja Ernesto, M. 2012. Origin of the Rio Grande Rise–Walvis Ridge reviewed integrating palaeogeographic reconstruction, isotope geochemistry and flexural modelling. *Teoksessa: Mohriak, W.U., Danforth, A., Post, P.J., Brown, D.E., Tari, G.C., Nem’ok, M. ja Sinha, S.T. (toim.). Conjugate Divergent Margins*. Geological Society, London, Special Publications 369:129–146.

JUSSI S. HEINONEN

jussi.s.heinonen@helsinki.fi

tutkijatohtori

Luonnontieteellinen keskusmuseo, LUOMUS

PL 44

00014 Helsingin yliopisto