

# Miksi maapallolla tärisee?

**ANNAKAISA KORJA** tekniikan dos. FT, **PEKKA HEIKKINEN**, Seismologian laitoksen johtaja, FT, ja **KATI KARKKULAINEN**, tutkimusapulainen, Luk; Helsingin yliopiston seismologian laitos

**Laattatektoniikkateoria on yksi niistä suurista luonnontieteellisistä teorioista, jotka oleellisesti ovat muuttaneet ihmisen maailmankuvaa. Laattatektoniikka selittää mm., miten ja miksi meret ja vuoristot syntyvät sekä miten tulivuorten ja maanjäristysten levineisyydet liittyvät toisiinsa.**

Kuten Darwinin luonnonvalintateoria ja Einsteinin suhteellisuusteoria mullistivat ihmisen käsitystä biologisista ja fysikaalisista luonnonlaeista, laattatektoniikka mullisti käsityksemme maapallon pinnanmuotojen synnystä ja sen geologisesta kehityksestä.

Laattatektoniikkateoria sai yhtenäisen muotonsa 1960-luvulla. Dan P. McKenzie, yksi tutkijoista, jotka pukivat teorian täsmälliseen muotoon, sai vuonna 2002 ansiostaan Crawfoord-palkinnon (eli Ruotsin Akatemian geotieteille, matematiikalle ja kliiniselle lääketieteelle jakaman, Nobel-palkintoa vastaavan palkinnon). Seuraavassa esitämme suuresti yksinkertaistetun version laattatektoniikasta ja siihen liittyvistä luonnonilmiöistä.

## Konvektiovirtaukset

Maapallon kova pintaosa, litosfääri, on jakautunut laatoiksi, jotka liikkuvat plastisemman astenosfäärin pinnalla. Laattoja liikuttavat konvektiovirtaukset, jotka syntyvät maapallon vaipan ja sydämen rajapinnalla (Kuva 1). Litosfääri voidaan jakaa ohuempaan merelliseen litosfääriin, jota on valtameren alla ja syntyy jatkuvasti merten keskiselänteillä, sekä paksumpaan mantereeseen litosfääriin, jota syntyy merellisen litosfääriin sulaessa

subduktio- eli alityöntövyöhykkeillä.

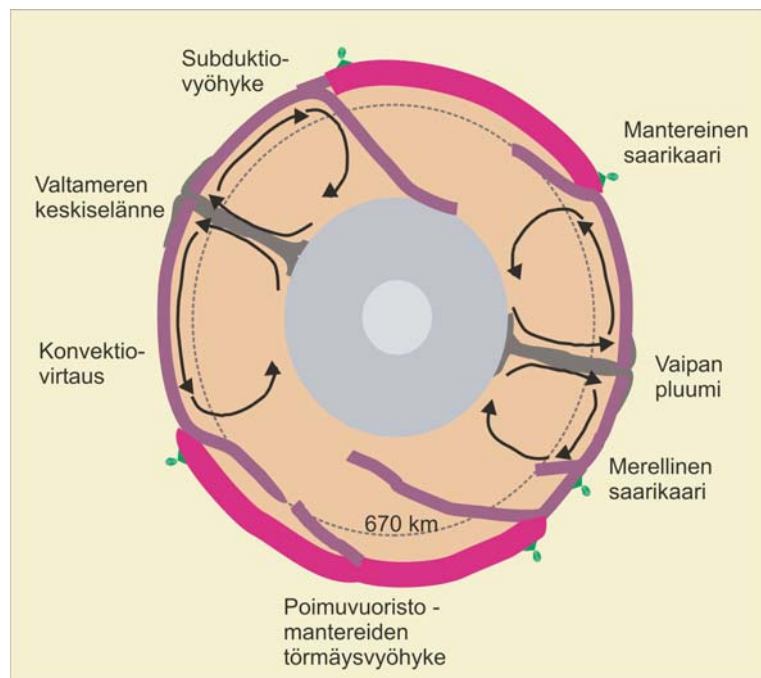
Virtaukset pyrkivät jäädyttämään maapalloa ja saavat siis energiansa maapallon sisäisistä lämpötilaeroista. Maapallon vaipan yläosassa 100 km:n syvyydellä lämpötila on noin 1000°C astetta, kun taas vaipan alaosassa, 3000 km:n syvyydellä, lämpötilan on arvioitu olevan 3000 °C - 4000 °C astetta. Vaipan alapuolella olevassa sulassa rauta-nikkeli-sydämessä lämpötila on vieläkin korkeampi. Konvektiovirtauksissa maapallon sisäosien (vaipan alaosan) lämpimämpi massa siirtyy lähemmäs maanpintaa valtameren keskiselänteillä. Koska vain pieni osa kuumemmasta massavirtauksesta voi purkautua merenpohjaan, suurin osa jo hieman jäähtyneestä virta-

uksesta leviää merellisen litosfääri-laatan alle kuljettaen laattaa pois-päin valtameren keskiselänteestä.

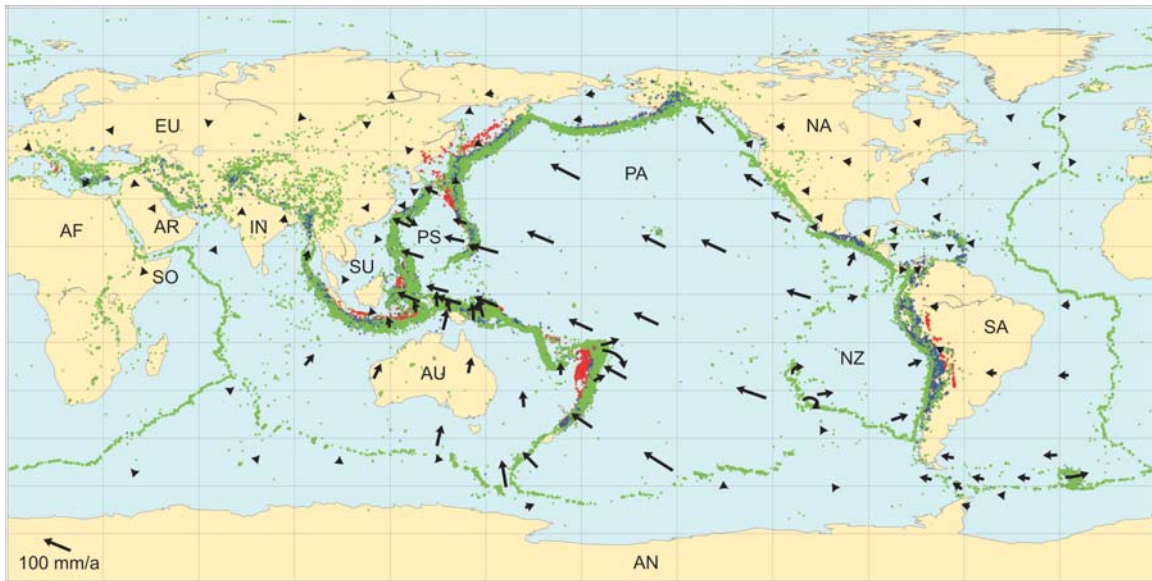
Kun massavirtaus on jäähtynyt tarpeeksi, sen tiheys kasvaa ja painovoiman vaikutuksesta jäähtynyt virtaus kääntyy alaspäin. Virtaus muodostaa siis kiehuvan veden tapaan virtaussilmukan eli konvektiosolun. Jos konvektiovirtaus syntyy mantereiden alapuolelle, voi seurauksena olla mantereiden repeäminen ja uuden valtameren syntyminen. Tällainen prosessi on tällä hetkellä käynnissä Itä-Afrikan hautavaajoaman kohdalla.

## Laattatektoniikkateoriasta

Maapallon pintaosa on jakautunut kolmeentoista päälähtään ja suureen joukkoon niiden reu-



Kuva 1. Konvektiovirtaukset ja litosfäärilaatat pallopinnalla.



Kuva 2. Maanjäristyksen keskittyvät litosfäärilaattojen reunoille. Kuvassa on esitetty vuosien 1900 ja 2004 välisenä aikana havaitut maanjäristykset. Vihreät ovat matalia < 35 km, siniset keskisyviä 35-200 km ja punaiset syviä > 200 km syvyydellä tapahtuneita maanjäristyksiä. Nopeusvektorit kuvaavat laattojen liikkeen suuntaa ja suuruutta. Suurimmat 13 laattaa on merkitty kansainvälisin kirjainyhdistelmin AF- Afrikka, AN - Antarktika, AR - Arabia, AU - Australia, EU - Euraasia, IN - Intia, NA - Pohjois-merikka, NZ - Nazca, PA -Tyynivaltameri, PS - Filippiinien meri, SA - Etelä-Amerikka, SO - Somalia, SU - Sunda.

noille syntyneitä pieniä laattoja tai laattariekaaleita (Kuva 2). Laattarajat ovat kaaria, sillä tason leikkaus pallopinnalla on kaari. Laatta voidaan määritellä sellaiseksi litosfääriin kappaleeksi, joka liikkuu muotoaan oleellisesti muuttamatta ja jolla on erilainen nopeusvektori kuin viereisellä laattalla, eli se liikkuu eri suuntaan ja eri nopeudella kuin viereiset laatat (Kuva 3 s. 8).

Laattojen keskinäistä liikettä vastustaa niiden välinen kitka. Kun laattojen välinen kitka on suurempi kuin niiden välisellä rajapinnalla vaikuttava jännitysvoima, laatat eivät liiku toistensa suhteen vaan rajapinnalle syntyy jännityskertymä. Liikkeen jatkuessa jännitysvoimat kasvavat ja jossakin vaiheessa ylittävät kitkavoimat, jolloin jännitys purkautuu äkillisesti maanjäristyksenä. Joissakin tapauksissa laattojen välinen kitka voi olla vähäinen, jolloin

laatat liikkuvat toistensa suhteen ilman näkyviä merkkejä, silloin liikettä kutsutaan aseismiseksi. Maanjäristyksessä purkautuneen jännitysenergian suuruutta kuvaa järistyksen magnitudi. Maapallon seismisyys- eli maanjäristyskartat paljastavat suurimman osan nykyisistä ja entisistä laattarajoista.

Litosfäärilaatat voivat joko erkautua, lähetä tai liukua sivuttain toisiinsa nähden (kuva 3 s:lla 8), minkä perusteella laattarajat voidaan jakaa kolmeen tyyppiin. Kun laatat erkanevat, niiden välille muodostuu *keskiselänne*. Jos taas laatat lähenevät, syntyy *subduktio*- tai *törmäysvyöhyke*, ja jos taas ne liukuvat toistensa ohi sivuttain, syntyy *transformisiiros*. Pieniä reunalaittoja syntyy silloin, kun päälaattojen liikkeet eivät ole täsmälleen joko samansuuntaisia tai kohtisuorassa toisiinsa nähden. Esimerkkinä laattojen keskinäisistä liikesuunnista on kuvassa 5 esitet-

ty Intian, Australian, Euraasian, Sundan ja Burman laattojen keskinäiset liikevektorit ja laattarajat.

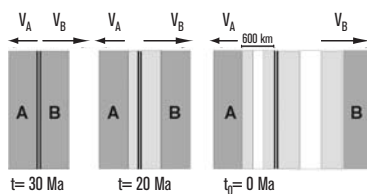
Koska laattaliikkeet ovat ihmisen aikakäsityksen mukaan hitaita (20-150 mm/a), niiden havaitseminen oli alun perin kovin vaikeaa. Ensimmäiset havainnot laattaliikkeistä tehtiin 1960-luvun uusista merenpohjan magneettisista kartoista, joissa havaittiin magneettisten anomalioiden vaihteluita keskiselänneiden molemmin puolin (Kuva 3). Vaihtelut osoittautuvat pian Maan magneettikentän napaisuuden vaihteluiksi ja vaihteluiden aikavälit olivat miljoonien ja kymmenien miljoonien vuosien luokkaa. Napaisuuskäännöksistä on tarkemmin kerrottu *Dimensio*-lehden numerossa 5/2004. Nykyisin laattojen absoluuttisia liikenopeuksia mitataan GPS-verkoilla.

→

→

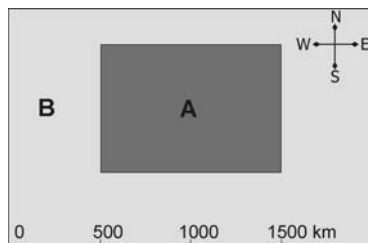
## Laattaliikkeet

Yhtenäisen laatan liike maapallon pinnalla voidaan kuvata pallon pinnalla sijaitsevan pisteen ympäri tapahtuvana kiertoliikkeenä. Tämä piste, jota kutsutaan laatan Eulerin navaksi, voi sijaita laatan sisä- tai ulkopuolella (Kuva 4). Koska transformisiirrokset muodostuvat vain laattaliikkeen suunnassa, niiden avulla voidaan määrittellä liikkeen suhteellinen suunta. Merellisen laatan sisäiset transformisiirrokset syntyvät kiertymisnapaa kiertäville isoymyröille (Kuva 4b). Transformisiirrokset ovat siis isoymyrän lyhyitä kaaria, joita pai-



Kuva 3. Yksinkertaisia esimerkkejä laattaliikkeistä.

3 a) Valtameren magneettisten poikkeamien (anomaliat) käyttö laattarakonstruktioissa. Keskiselänneellä purkautuu magmaa, johon tallentuu valitsevan magneettikentän polariteetti. Magneettiset anomaliat syntyvät molemmin puolin keskiselännettä. Koska polariteetti vaihtuu napaisuuskäännösten takia, niitä voidaan käyttää aikamittareina laattatektonisissa tutkimuksissa.



3 b) Laattojen suhteellinen liike. Leikkaa laatta A irti ja kokeile, millaisia laattarajoja syntyy, kun sitä liikuttelaan eri ilmansuuntiin.

kallisesti voidaan aproksimoida kaaren tangentilla eli murtoviivalla. Eulerin napa voidaan määrätä kaikkien kaarten kautta piirrettävien ympyröiden yhteisenä keskipisteenä ja se voidaan etsiä määrittämällä kaarien säteiden leikkauspisteenä (Kuva 4a). Keskiselänneet puolestaan ovat yleensä suoraa ja lähes kohtisuorassa nopeusvektorikenttää vasten, mutta niiden suunnat voivat vaihdella jopa 15 astetta. Subduktiovyöhykkeissä liikevektorit ovat paikallisesti vyöhykettä vastaan kohtisuorassa.

Laattaliikkeen nopeus määritellään kiertymisnopeutena eli kulmanopeutena ( $\omega$ ) Eulerin-navan ympäri. Laatan eri osissa liikeno-opeus vaihtelee, sillä nopeus on riippuvainen etäisyydestä Eulerin-napaan eli hetkellinen nopeus on  $V = r \cdot \omega$ . Eli mitä kauempana Eulerin navasta ollaan, sitä nopeammin laatta liikkuu ja sitä pidemmän matkan laatta liikkuu kunakin ajanjaksona.

Toisin kuin yleisesti luullaan, valtameren leviämissuuntaa ei voi päätellä keskiselänneen asennosta, vaan sitä pilkkovien transformisiir-

rosten suunnasta, jotka kertovat, mihin suuntaan vastakkaisilla rannoilla olevat mantereet ovat liikkumassa. Kahden laatan välisestä transformisiirroksesta puolestaan voidaan vetää se johtopäätös, että jompi kumpi laatoista liikkuu siirrokseen suunnassa. Esimerkiksi San Andreas-siirros on luode-kaakko-suunnassa, koska Tyynenmeren laatta liikkuu luoteeseen ja toisaalta Anatolian siirros on itä-läntinen, koska Euraasian laatta liikkuu itään.

## Subduktiovyöhykkeet

Koska maapallon pinta-ala on vakio, niin uutta merellistä litosfääriä voi muodostua vain, jos vastavasti muualla litosfääriä tuhoutuu. Tuhoutuminen ja uudelleen muokautuminen tapahtuu lähenevillä laattarajoilla eli subduktio- tai törmäysvyöhykkeissä. Subduktiovyöhykkeissä merellinen litosfääri painuu toisen litosfäärilaatan alle kohtisuorassa suunnassa mannerreunaa vasten. Subduktiovyöhykkeissä maanjäristyksiä havaitaan alaspäin kallistuvassa tasossa siten, että maanjäristysten syvyys kasvaa

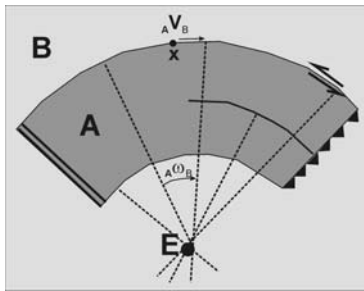
## Laskuesimerkit kuvista 3a ja 3b

Laskuesimerkki 1. kuvasta 3a. a) Milloin kuvan meri alkoi aueta, jos magneettiset anomaliat vaihtavat polariteettia (musta/valkoinen) 10 miljoonan vuoden välein (30 Ma)? b) Millä nopeudella laatta A liikkuu? ( $20 \text{ km/Ma} = 20 \text{ mm/a}$ ) entä laatta B? ( $40 \text{ km/Ma} = 40 \text{ mm/a}$ ) c) Mikä on meren aukeamisnopeus ( $20 \text{ mm/a} + 40 \text{ mm/a} = 60 \text{ mm/a}$ )? Nykyhetkeä merkitään  $T=0$ .

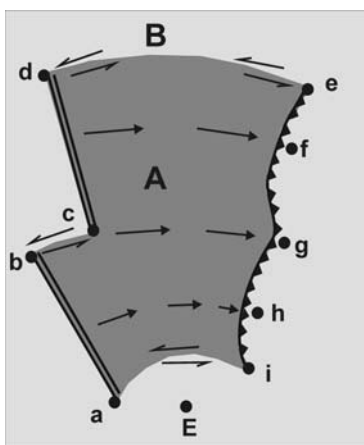
Toinen laskuesimerkki kuvasta 3a.

Jos Eurooppa liikkuu itään  $8 \text{ mm/a}$  ja Pohjois-Amerikka liikkuu länteen  $15 \text{ mm/a}$ , niin koska  $3500 \text{ km}$  leveä Pohjois-Atlantin valtameri alkoi aueta?

Laskuesimerkki kuvasta 3b. Oletetaan kuvan b mukainen yksinkertainen mahdollinen laattapari, jossa laatta A on muodostunut laatan B sisälle. Laatta A liikkuu laattaan B nähden  $50 \text{ mm/a}$  nopeudella. Millaiset laattarajat syntyvät, jos laatta A liikkuu itään (E)  $50 \text{ mm/a}$ ? Piirrä tilanne 10 Ma kuluttua. Huomaa, että merenpohjaa syntyy keskiselänne molemmin puolin. Milloin alkuperäinen laatta A on tuhoutunut kokonaan? Entä millaiset laattarajat syntyvät, jos laatta A liikkuu koilliseen (NE)  $50 \text{ mm/a}$ ? Milloin laatta A silloin tuhoutuu? Piirroksessa lähenevää laattarajaa merkitään pienillä kolmioilla, erkanevaa rajaa kaksoisviivalla ja transformisiirrosta liikkeen suuntaisilla nuolilla.



Kuva 4. Laattareumatyyppit. a) laattojen kiertyminen Eulerin-navan (E) ympäri.



4 b) Laattarajojen tyyppit. Laattarajat ovat joko keskiselänteitä (parilliset suorat viivat), subduktiovyöhykkeitä (mustat kolmiot) tai transformisiirroksia (vastakkaiset nuolet). Nuolen suunta osoittaa laatan suhteellista liikettä. Transformit ai, bc ja de ovat nopeuskentän suuntaisia ja E-pisteen kehällä.

alityönön suunnassa (Kuva 2).

Kun merellinen laatta on painunut noin 70 km - 100 km syvyydelle, siitä vapautuu vettä paineen ja lämpötilan vaikutuksesta. Kevyempänä vesi nousee ylös ja alentaa yläpuolisen litosfäärilaatan vaipan sulamispistettä aiheuttaen mineraalien sulamista eli magmamuodostusta. Sulanut magma nousee puolestaan ylös muodostaen yläpuolelle vulkaanisen tulivuoriketjun eli vulkaanisen kaaren. Eräs maailman pisimmistä merellisistä vulkaanisista kaarista eli saarika-

### Laskuesimerkki kuvasta 4a

Mikä on laatan A hetkellinen nopeus pisteessä x kun laatan kulmanopeus on  $10^{-8}$  rad/a ja pisteen etäisyys Eulerin-navasta on 1000 km?

rista on Indonesian saariston pääosan muodostava Sundan saarikaarisysteemi, jonka länsipuolella on Jaavan syväne. Saarikaari alkaa Bengalin lahdelta kulkien kaarenmuotoista reittiä kaakkoon ja käsittää Andamanien, Nicobarin, Sumatran, Jaavan saaristot. Tässä vyöhykkeessä Australian ja Intian laattojen merelliset osat subduktoituvat Euraasian ja sen reunalla olevien pienempien laattojen, kuten Burman laatan alle. Intian laatta liikkuu 60 mm/a pohjoiseen ja Australian laatta 75 mm/a koilliseen.

### Sumatran maanjäristykset

Kun merellinen Intian laatta työnnyttävä mantereisen Burman mikrolaatan alle 60 mm/a, vastaavasti Burman laatan pitäisi liikkua luoteeseen Intian laatan päälle. Tapaninpäivän suuressa maanjäristyksessä 26.12. 2004 havaitusta laatan siirtymästä (20 m) päätellen tämä liike on ollut lukkiutuneena useita satoja vuosia. Lukkiutuminen on aiheuttanut jännityksen kertymistä Burman laattaan ja sen nousua ylöspäin. Pitkäaikainen jännityskertymä purkautui Sumatran tapaninpäivän pää- ja jälkijäristyksissä (Kuvat 5 ja 6 s:lla 10).

Sumatran pääjäristyksessä (9  $M_w$ ; Kuvat 5 ja 6) Burman laatta länsireuna liikkui koko pituudeltaan, 1200 km matkalta länteen päin ylityöntösiirrosta pitkin (Kuva 6). Ylityöntösiirros oli  $10-15^\circ$  asteen kulmassa ja siirrostasolla laatta siirtyi suurimmillaan 20 m. Vaakasunnassa liike oli siis jopa 19 m länteen ja 5 m ylöspäin.

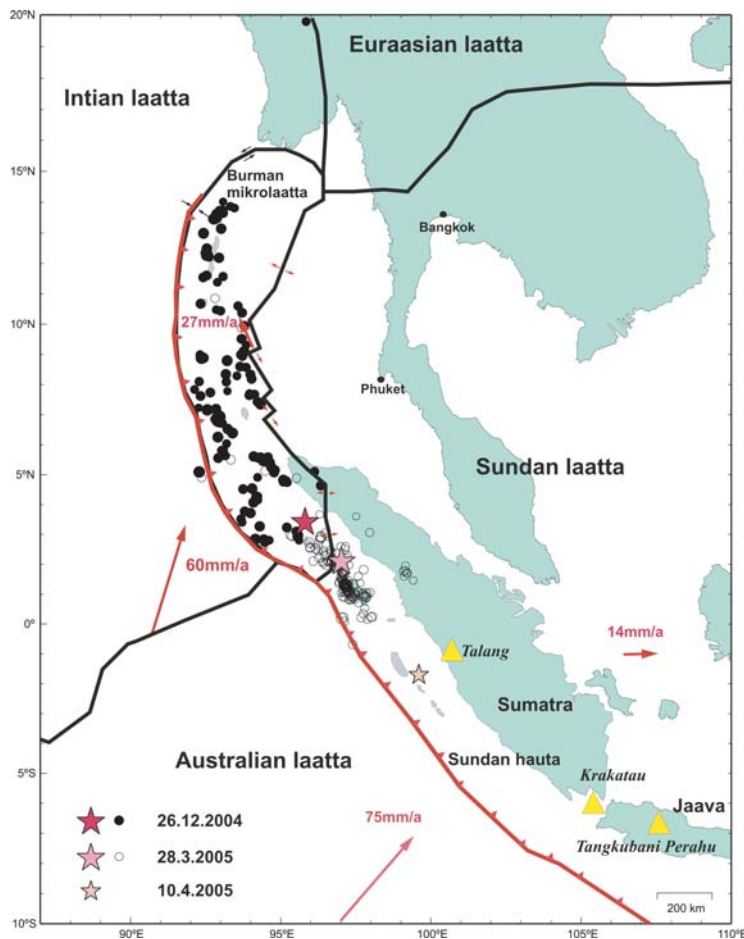
Maanjäristyksessä syntyvä repeämä eteni pohjoiseen nopeudella 2 - 3 km/s. Koko laatta oli siis siirtynyt länteen päin noin 8 minuutissa. Vaikka laatan liikahtaminen ja suuren järistyksen mahdollisuus olivatkin ennakoitavissa, kukaan ei voinut ennustaa aikaa eikä paikkaa eikä varsinaan liikkuneen alueen suuruutta. Pääjäristyksen jälkeen laattareunalla on ollut useita jälkijäristyksiä. Toisen pääsiäispäivän järistys (8.7  $M_w$ ) sattui suoraan tapaninpäivän järistyksen siirrosalueen eteläisellä jatkeella. Ilmeisesti aiemmassa järistyksessä lauennut jännitys aiheutti jännityksen kasvua repeämävyöhykkeen lähialueilla.

Merenpohjan äkillinen nousu ylöspäin aiheutti tuhoisan tsunamin eli hyökyaallon. Tsunami aiheutui, kun siirroksen yläpuolinen valtameren 4000 m paksu vesimassa nousi ylöspäin jopa 5 m 1200 km matkalta. Vesi sai tällöin valtavan määrän potentiaalienergiaa, joka lähti leviämään ympäristöönsä hyökyaaltona.

### Törmäsvyöhykkeet

Toinen tyyppi lähenevistä laatoista ovat törmäsvyöhykkeet, joissa kaksi mannta tai kaarta törmää toisiinsa merellisen litosfäärin kulluttua subduktiossa loppuun. Mannteren törmätessä toinen laatta nousee toisen päälle tai toinen laatta halkeaa kahtia. Törmäyssau-moihin muodostuu poimuvuoristo, jollaisia ovat esimerkiksi Alpit ja Himalaja (Kuva 2). Mikäli törmäys ei ole suora, syntyy jälleen laatta-reunojen suuntaisia siirroksia.

Himalajan vuoriston syntyminen on pitkän tapahtumaketjun loppuhuipennus. Se alkaa Gondwana-mantereen (Etelä-Amerikka, Afrikka, Madagaskar, Arabia, Etelänapa, Australia, Intia), hajoamisella 160 Ma sitten ja Tet-

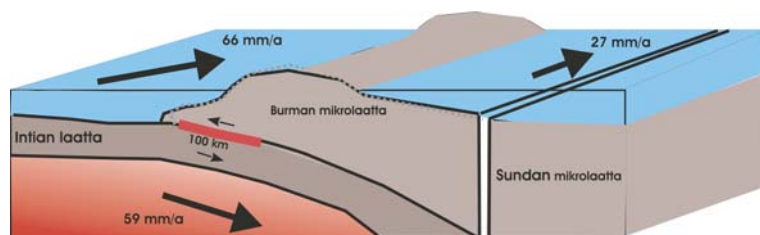


Kuva 5. Intian, Australian, Euraasian, Burman ja Sundan laattojen rajat sekä Sumatran maanjäristysten episentrit (tähdet) ja jälkijäristykset (ympyrät). Subduktiovyöhyke on merkitty punaisilla kolmioilla. Nuolet osoittavat laattojen liikesuuntia ja suuruuksia. Aktiiviset tulivuoret on merkitty keltaisilla kolmioilla.

hys-meren aukeamisella, mistä on tehty useita animaatioita <http://kartoweb.itc.nl/gondwana/gondwana.html>. Myöhemmin Intia erkani Australiasta ja Etelänapamantereesta (130 Ma sitten) ja törmäsi lopuksi Euraasiaan (10 Ma) synnyttäen Himalajan vuoris-

riston. Törmäys muutti laattaliikkeiden suuntia. Muun muassa Intian valtameren aukeamissuunnassa tapahtui tämän jälkeen selvä muutos ja nykyisin Indo-Australian laatta liikkuu itään ja subduktoituu Sundan laatan alle.

Euroopassa Alppilaisen vuoris-



Kuva 6. Lohkodiagrammi Burman laatan liikkeestä.

ton muodostuminen on aiheutunut Euraasian ja Afrikan törmämisestä. Vuoriston muodostus on yhä käynnissä ja se loppuu vasta Välimeren umpeuduttua. Nykyiset Alpit alkoivat muodostua Afrikan reunasta irronneiden reuna-kappaleiden törmättyä Euraasiaan 60 miljoonaa vuotta sitten. Mikäli laatat jatkavat nykyisiä liikkeitään, Välimeri sulkeutuu 50 miljoonan vuoden kuluttua.

### Maapallon kehittäjä

Maapallon kehitystä olisi vaikea kuvitella ilman konvektiovirtauksia ja laattatektoniikkaa. Näiden prosessien seurauksia ovat mm. maailman valtameret, mantereet ja ilmakehä, joka muodostui alun perin tulivuorenpurkausten kaasuista. Niin ikään prosessien suorana seurauksena voidaan pitää tulivuorialueiden viljavia maita, mistä suuri osa maapallon asukkaista saa elantonsa.

Kotimaisia verkkosivuja, joilta löytyy suomenkielisiä materiaalia kiinteän maan geofysikaalisista ilmiöistä:  
 Helsingin yliopiston seismologian laitos; <http://www.seismo.helsinki.fi/>  
 Helsingin yliopiston geofysiikan osasto <http://www.geophysics.helsinki.fi/>  
 Oulun yliopiston geofysiikan osasto <http://www.gf.oulu.fi/>  
 Geologian tutkimuskeskus <http://www.gtk.fi/>

### Kirjallisuutta:

- Ahvenisto, Ursula; Borén, Esa; Hjelt, Sven-Erik; Karjalainen, Tuja; Sirviö, Jarmo; 2004. Geofysiikka: Tunne maapallosi. Porvoo: WSOY. 191 s.  
 Hjelt, Sven-Erik, 2004. Geofysiikan matka maan keskipisteeseen. Dimensio 5/2004, 4-8.  
 Kakkuri, Juhani 1991. Planeetta maa. Helsinki: Tähtitieteellinen yhdistys URSA. Ursan julkaisuja; 42: 184 s.  
 Korja, Annakaisa; Pesonen, Lauri J.; Beckmann, Aike 2005. Indonesian luonnonkatastrofi - tietoa maanjäristyksistä ja hyökyaalloista. Geologi 57 (2), 37-46.  
 Lehtinen, Martti (toim.); Nurmi, Pekka (toim.); Rämö, Tapani (toim.) 1998. Suomen kallioperän 3000 vuosimiljoonaa. Helsinki: Suomen Geologinen Seura. 375 s. ISBN 952-90-9260-1.