

Geotieteiden valintakoe 2024

Lue huolellisesti kaikki ohjeet läpi

Koe koostuu kahdesta osasta. Voit jakaa koeajan osien välillä haluamallasi tavalla. Voit liikkua osien välillä kokeen aikana vapaasti. Tallenna vastauksesi aina ennen tehtävästä poistumista.

Sinulla saa kokeen aikana olla auki ainoastaan valintakoejärjestelmä sekä erillinen aineistotiedosto.

Voit luonnostella vastauksiasi ruutupaperille. Ruutupaperille tekemiäsi merkintöjä ei huomioida arvostelussa.

Valintakokeessa on pdf-muodossa olevaa aineistoa. Aineiston saa vetää erilliseen ikkunaan kysymysten rinnalle. Selaimen etsi-toiminnon (Ctrl+F tai Cmd+F) käyttäminen on sallittua.

Kokeessa jaettava aineisto on tarkoitettu vain valintakoeikäyttöön. Tekijänoikeudellisista syistä materiaalia ei saa jakaa eteenpäin.

Valintakokeen arviointi

Valintakokeen enimmäispistemäärä on yhteensä 30 pistettä. Valintakokeen ensimmäinen tehtävä (tehtävä 1, 10 pistettä) on karsiva tehtävä, josta saamiensa pisteiden perusteella hakijat asetetaan paremmuusjärjestykseen. Eniten ensimmäisestä tehtävästä pisteitä saaneet hakijat etenevät arvioinnin toiseen vaiheeseen. Toiseen arviointivaiheeseen etenevien määrä on vähintään 45.

Sinut voidaan hyväksyä vain, jos saat kokeen toisesta osasta vähintään pienimmän hyväksyttävissä olevan pistemäärän. Pienimmän hyväksyttävissä olevan pistemäärän päättää kokeen arviointiryhmä. Hakijat asetetaan lopulliseen valintajärjestykseen osan 2 yhteispisteiden perusteella (enintään 20 pistettä).

OSA 1 Tehtävä 1: monivalintakysymykset

Osa 1, tehtävä 1

Kokeen ensimmäinen osa on monivalintatehtävä, joka sisältää kymmenen kysymystä. Jokaiseen kysymykseen on neljä vastausvaihtoehtoa, joista yksi on oikea ja kolme väärä. Oikea vastaus antaa +1 pistettä ja muut vastaukset -0,5 pistettä. Vastaamatta jättäminen antaa 0 pistettä.

Tehtävästä 1 voit saada yhteensä 10 pistettä.

Kysymys 1.1.

Paleontologeille ja paleoekologeille evoluutioteoria on tutkimuksen keskeisin viitekehys ja siksi sen perusteiden ymmärtäminen on tärkeää. Seuraava kysymys liittyy evoluutioteoriaan: Tulivuori purkautui saarella. Tulivuoresta vapautunut tuhka muutti maaperän happamuutta (pH) tasolta, jolla se oli ollut satoja vuosia. Tämä muutos maaperän happamuudessa aiheutti uusia ympäristöpaineita maaperän eliölajeille. Mikä seuraavista on näiden paineiden todennäköinen tulos? Valitse vaihtoehdoista se, jota pidät OIKEANA.

- Jotkut lajit katoavat maaperästä, koska näiden lajien yksilöillä ei ole ominaisuuksia, jotka mahdollistaisivat niiden selviytymisen happamuudeltaan muuttuneessa maaperässä.
- Vain jotkut lajit kykenevät kehittämään tarvitsemansa mutaatiot muutokseen sopeutumista varten, muut lajit kuolevat sukupuuttoon.

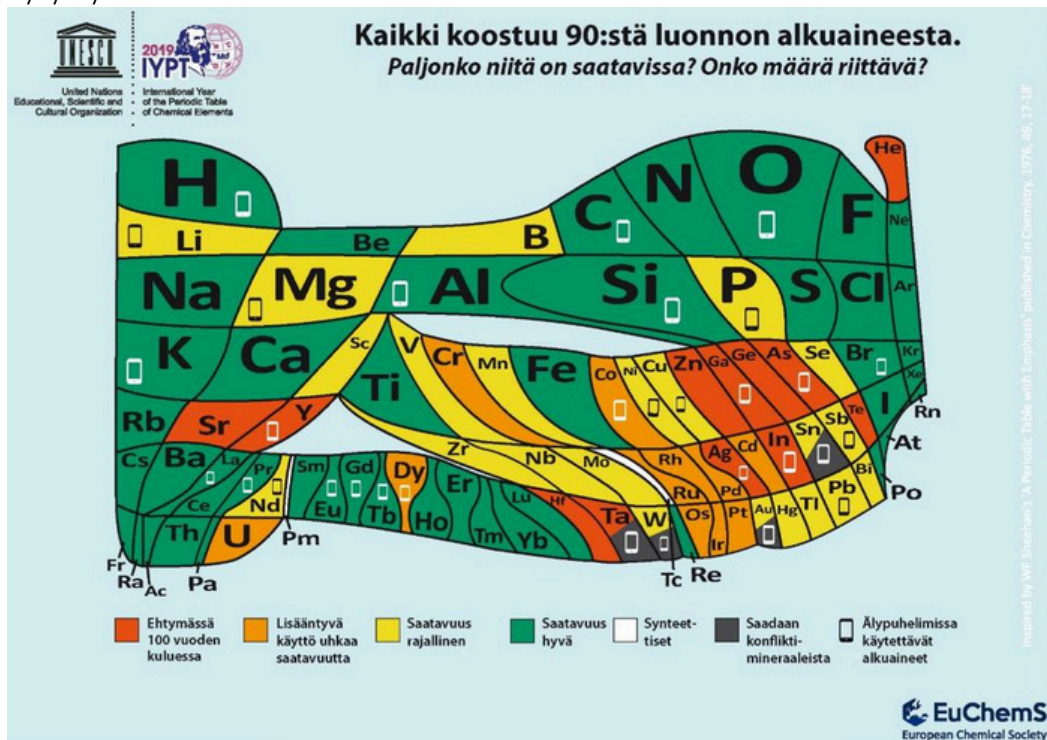
- c. Useimmat lajit saavat lisää geneettisesti periytyviä ominaisuuksia, ja tämä monimutkaisuuden lisääntyminen antaa näille lajeille mahdollisuuden elää happamuudeltaan muuttuneessa
- d. maaperässä. Jokaisen lajin yksilöt kehittävät ominaisuuksia, joita tarvitaan muuttuneissa olosuhteissa.

Kysymys 1.2

Kivihiilikauden (359–299 miljoonaa vuotta sitten) aikana mantereiset alueet peittyivät ensimmäistä kertaa metsäkasvillisuudella ja erityisesti kauden jälkimmäisellä puoliskolla alaville alueille levittäytyi valtavia suometsiä. Näissä kosteissa ympäristöissä kuollut kasviaines kerrostui hapettomissa olosuhteissa ja merenpinnan ajoittain kohotessa peittyi sedimenteillä. Tässä prosessissa kasvijäännökset muuttuivat vähitellen kivihiileksi. Kun kivihiiltä nykyään hyödynnetään energianlähteenä polttamalla, siihen sitoutunut hiili vapautuu ja muodostaa yhdessä hapen kanssa hiilidioksidia, joka puolestaan lämmittää maapallon ilmastoa. Mitä voit näiden tietojen perusteella päätellä ilmakehän koostumuksen ja maapallon lämpötilan kehityksestä kivihiilikaudella? Valitse vaihtoehto, jota pidät OIKEANA.

- a. Kauden aikana ilmakehän happi- ja hiilidioksidipitoisuus kohosi ja maapallon keskilämpötila kohosi.
- b. Kauden aikana ilmakehän happi- ja hiilidioksidipitoisuus kohosi ja maapallon keskilämpötila laski.
- c. Kauden aikana ilmakehän happipitoisuus kohosi, hiilidioksidipitoisuus laski ja maapallon keskilämpötila laski
- d. Kauden aikana ilmakehän happipitoisuus laski, hiilidioksidipitoisuus kohosi ja maapallon keskilämpötila kohosi.

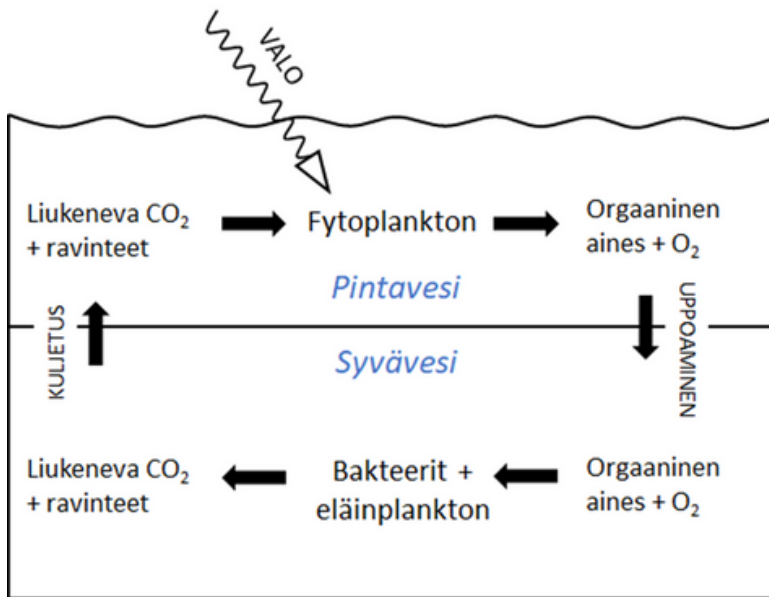
Kysymys 1.3



Katso yllä olevaa jaksollista järjestelmää. Alkuaineiden suhteellinen esiintyvyys maapallolla esitetään symbolien koon avulla. Valitse, mikä seuraavista väittämistä on OIKEIN:

- a. Älypuhelimissa käytetään vain raskaampia alkuaineita.
- b. Kevyempien alkuaineiden esiintyvyys maapallolla on suurempi kuin raskaampien.
- c. Kaikki alkuaineet, joiden ennustetaan olevan ehtymässä 100 vuoden kuluessa, ovat metalleja.
- d. Lisääntyvä käyttö uhkaa raudan saatavuutta.

Kysymys 1.4



Katso yllä olevaa diagrammia, joka kuvaa valtameren biogeokemiallista kiertoa. Pintavedessä, jossa on valo, fytoplankton ottaa hiilidioksidia ja ravinteita talteen biomassaan (orgaaninen aines). Kuollut biomassa uppoaa syvään veteen, jossa bakteerit ja eläinplankton hajottavat sitä, vapauttaen hiilidioksidia ja ravinteita. Veden kumpuaminen, mahdollisesti muualla valtamerissä, kuljettaa hiilidioksidia ja ravinteita takaisin pintaveteen.

Seuraavat yhtälöt kuvaavat prosesseja:

- $106 \text{ CO}_2 + 16 \text{ H}_2 + 16 \text{ NO}_3 + \text{H}_3\text{PO}_4 + 122 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow (\text{CH}_2\text{O})_{106}(\text{NH}_3)_{16}(\text{H}_3\text{PO}_4) + 138 \text{ O}_2$
- $(\text{CHO})_{106}(\text{N}_3)_{16}(\text{H}_3\text{PO}_4) + 138 \text{ O}_2 \rightarrow 106 \text{ CO}_2 + 16 \text{ H}_2 + 16 \text{ NO}_3 + \text{H}_3\text{PO}_4 + 122 \text{ H}_2\text{O}$

Valitse, mikä seuraavista väittämistä on OIKEIN:

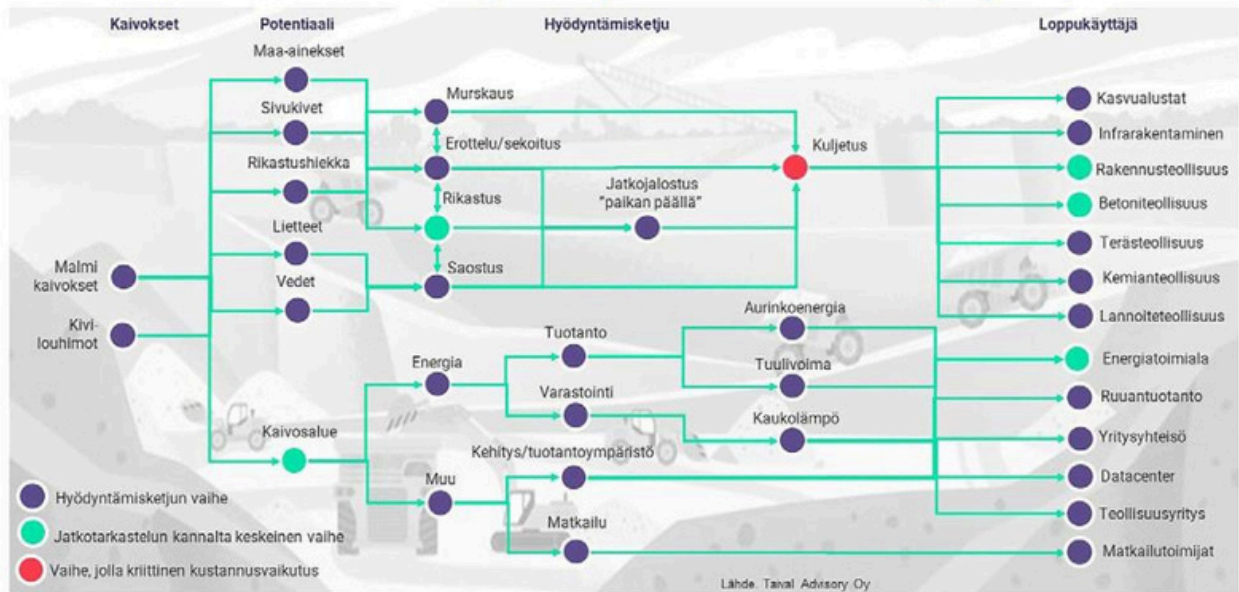
- Yhtälö 1 kuvaa orgaanisen aineksen hajoamista syvässä vedessä.
- Orgaanisen aineksen hajoaminen kuluttaa happea.
- Fytoplankton tarvitsee enemmän fosforia (P) kuin typpeä (N).
- Jos ravinnekuorma valtameren pienenee, fytoplanktonin perustuotanto lisääntyy.

Kysymys 1.5

Valtioneuvosto teki periaatepäätöksen kiertotalouden strategisesta ohjelmasta keväällä 2021. Kiertotalousohjelman visio on, että vuonna 2035 Suomen menestyvän talouden perusta on hiilineutraali kiertotalousyhteiskunta. Tämän vision toteutumisen edellyttää luonnonvarojen kestävä ja tehokasta käyttöä.

Kaivannaisjätteitä syntyy Suomessa noin 90 miljoonaa tonnia vuodessa. Tämä on 75 prosenttia kaikesta vuosittain Suomessa syntyvästä jätemassasta. Työ- ja elinkeinoministeriön teettämän esiselvityksen (Vasara et al. 2023) mukaan kaivosten sivukiviä ja rikastushiekkaa on mahdollista hyödyntää monipuolisesti.

Mahdollisia hyödyntämisketjuja



Kuva 1.5 Kaavio potentiaalisista kaivosten sivuvirtojen hyödyntämisketjuista. Lähde: Vasara et al. 2023.

Päättele kuvan perusteella OIKEA vaihtoehto:

- Rikastusprosessien kehittäminen ei koske kaivosvesiä ja -lietteitä.
- Kaivosalueella ei ole potentiaalia energiantuotannossa.
- Rikastushiekkan ja sivukivien käytön mielekkyys rakennusteollisuudessa ei riipu kuljetuskustannuksista.
- Kaivosalueen käyttö matkailutarkoituksiin on potentiaalinen vaihtoehto.

Kysymys 1.6

Vesi on maailman hyödynnettyin luonnonvara. Vesi luonnonvarana on uusiutuva, mutta samalla myös rajallinen. Maapallon vesivarat riittäisivät 20–30 miljardille ihmiselle, jos vesi olisi tasaisemmin jakaantunut. Veden kiertokulun ja pohjaveden esiintymisen tunteminen on erittäin tärkeää etenkin vedenhankinnan kannalta. Pohjavesivarat ovat rajalliset. Siksi niiden tunteminen, hallinta ja kestävä käyttö on tärkeää nykypäivän ja tulevaisuuden kannalta.

Valitse edellä kerrotun ja aiemmin oppimasi perusteella vaihtoehdoista se, joka on OIKEIN.

- Piilovedellä tarkoitetaan maaperän hiukkasiin kiinnittynyttä vettä, jota vaikea hyödyntää.
- Pohjavesi virtaa kohti merta.
- Suurin osa maapallon makean veden varannoista sijaitsee pohjavedessä.
- Nykyisen kaltainen elämä ei olisi mahdollista ilman maapallon geotermisen energian ja painovoiman aiheuttamaa globaalia hydrologista kiertoa.

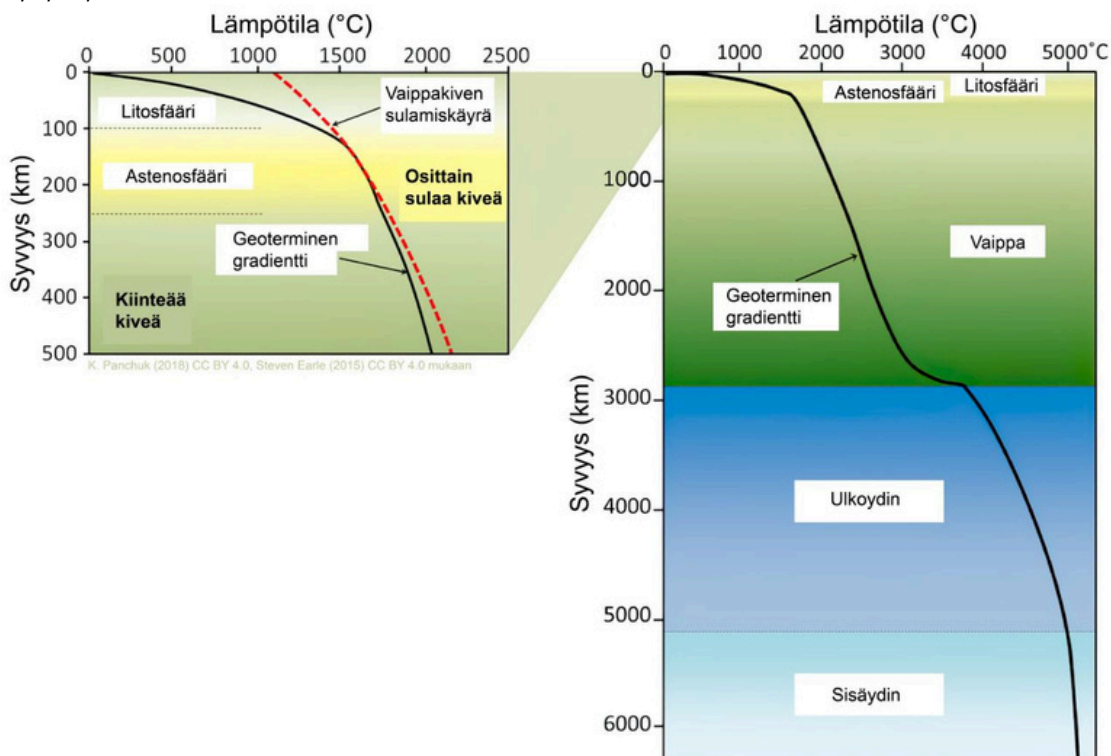
Kysymys 1.7

Hiekkaresurssien hallinta on yksi 2000-luvun suurimmista kestävyysaasteista. Hiekka, sora ja kiviaines ovat maailman toiseksi eniten hyödynnettyjä luonnonvaroja veden jälkeen. Näiden materiaalien käyttö on kolminkertaistunut kahden viime vuosikymmenen aikana saavuttaen 40–50 miljardia tonnia vuodessa. Tämän suuntauksen odotetaan jatkuvan, sillä kysyntä kasvaa edelleen kaupungistumisen, väestönkasvun ja infrastruktuurin kehityssuuntausten vuoksi. Hiekkaa ja soraa on yhä vaikeampi saada sinne missä

rakennetaan (UNEP 2022). Hiekan rakeiden kulmikkuus parantaa ratkaisevasti hiekan käyttökelpoisuutta rakentamiseen. Geologisessa kierrossa mineraaliainesta kuljettavat ja kerrostavat jää, vesi ja tuuli. Näistä jää vaikuttaa vähiten, ja tuuli eniten hiekkarakeen muotoon ja sen mineraalin kulumiseen. Jään kuljettama aines on kulmikasta ja vähän kulunutta, kun taas tuulikuljetus pyöristää ja kuluttaa mineraalipartikkeleita tehokkaasti. Valitse edellä kerrotun ja aiemmin oppimasi perusteella vaihtoehdoista se, joka on OIKEIN.

- Suomen sora- ja hiekkavarat ovat keskittyneet Lappiin granuliittikaaren alueelle.
- Suurin osa Suomen hiekkamuodostumista on jään kerrostamaa.
- Hiekkamuodostumat sijaitsevat maa-alueilla (eivät veden peittäminä).
- Dyynihiekan käyttökelpoisuus rakentamiseen on huono.

Kysymys 1.8



Kuvan musta viiva näyttää maapallon suurpiirteisen geotermisen gradientin, eli lämpötilan vaihtelun syvyysuunnassa ($^{\circ}\text{C}/\text{km}$). Vasemman kuva punainen katkoviiva näyttää kiven sulamislämpötilan eri syvyyksissä.

Mikä seuraavista väittämistä on TOTTA?

- Vaipan geoterminen gradientti on pienempi kuin sisäytimen.
- Kivisulaa syntyy pääosin yli 200 km syvyydessä.
- Maapallon vyöhykkeistä geoterminen gradientti on pienin litosfäärissä.
- Litosfäärin geoterminen gradientti on noin $15^{\circ}\text{C}/\text{km}$.

Kysymys 1.9

Jo satoja vuosia sitten huomattiin, että maapallon lämpötila nousee syvemmälle mentäessä. Tästä mm. William Thomson (Lord Kelvin) päätteli että maapallo on ollut syntyessään kuumempi ja on siitä lähtien jäähtynyt lämpödiffuusion takia. Olettaen että (1) maapallon syntylämpötila oli 4173 K (T), (2) termien diffuusiokerroin k on $37.8\text{ m}^2/\text{vuosi}$ ja geoterminen gradientti (β) on $3.6 \times 10^{-2}\text{ K/m}$, Lord Kelvin arvioi seuraavalla lämpödiffuusioyhtälöllä maapallon iän (t):

$$t = \frac{1}{\pi k} (T/\beta)^2.$$

Käyttäen näitä tietoja sekä aiemmin oppimaasi, kuinka lähelle maapallon nykytiedon mukaista ikää (n. 4,567 miljardia vuotta) Lord Kelvinin arvio asettuu?

- Maapallon oikea ikä on Kelvinin arviota yli 10 kertaa suurempi, koska Kelvin ei ottanut huomioon lämpöä tuottavaa radioaktiivista hajoamista.
- Maapallon oikea ikä on Kelvinin arviota yli 10 kertaa pienempi, koska Kelvin ei ottanut huomioon ilmaston lämmittävää vaikutusta.
- Maapallon oikea ikä on Kelvinin arviota yli 10 kertaa pienempi, koska Kelvin ei ottanut huomioon lämpöä tuottavaa radioaktiivista hajoamista.
- Kelvinin arvio osui $\pm 10\%$ haarukkaan maapallon oikeasta iästä.

Kysymys 1.10

Litostaattinen paine (P, yksikkö Pascal, Pa) maapallon kuoressa määräytyy syvyyden (h), yllä olevan kiven tiheyden (ρ) ja painovoimakiihtyvyyden (g) mukaan: $P = \rho gh$. Jos oletetaan että timantteja syntyy vain yli 5×10^9 Pa paineessa, päättele käyttäen ohessa olevan taulukon vakioita sekä aiemmin oppimaasi, mikä seuraavista väittämistä on TOTTA:

	g (m/s ²)	r (m)	ρ (kg/m ³)
Maapallo	9,82	6371 x 10 ³	3300
Kuu	1,62	1734 x 10 ³	2540
Pluto	0,62	1188 x 10 ³	1854

- Maapallolla timantteja voi syntyä 50 km syvyydessä.
- Plutossa ei voi syntyä timantteja koska litostaattinen paine ei ole riittävä.
- Timantteja voi syntyä Kuussa lähempänä pintaa kuin maapallolla, koska sen painovoima on pienempi.
- Maapallolla timantteja voi syntyä ainoastaan alavaipassa.

Lähteet:

Thomson, W. (1862). On the secular cooling of the Earth, Trans.Royal Soc. Edinburgh, XXIII, (1862) 157–169.

UNEP (2022). Sand and sustainability: 10 strategic recommendations to avert a crisis. GRID-Geneva, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland. Production: UNEP/GRID-Geneva.
<https://unepgrid.ch/en/resource/2022SAND>

Vasara H., Pokki, J., Långbacka B. ja Kivinen M. (2023). Kaivosalan toimintaraportti. TEM toimialaraportit 2023:4

Osa 2, tehtävä 2

Tehtävä 2 perustuu aineistoon ” Geologisten muodostumien ajoittaminen”. Lue ja perehdy aineistoon huolellisesti ja vastaa sen perusteella tehtävän 2 kysymyksiin.

Pohdi seuraavia kysymyksiä lukemasi perusteella. Vastaa omin sanoin ja käytä kokonaisia lauseita.

Tehtävästä 2 voit saada yhteensä 5 pistettä.

Kysymys 2.1

Pompeijin tuhonnut Vesuviuksen purkaus tapahtui vuonna 79 perustuen luonnontutkija Plinius Nuoremman silmännäkijäkertomukseen. Jos Pliniuksen kertomusta ei olisi, pohdi lukemasi perusteella, millä luonnontieteellisillä ajoitusmenetelmillä ja materiaaleilla purkauksen ajankohdasta voidaan saada tietoa? Valitse kaksi ajoitusmenetelmää ja perustele vastauksesi. (2p)

Kysymys 2.2

Saat ajoituslaboratoriosta kivinäytteellesi iän 1,4 miljardia vuotta perustuen U-Pb ajoitukseen. Selitä lyhyesti omin sanoin ystävällesi, miten ajoitus on tehty? (3p)

Osa 2, tehtävä 3

Tehtävä 3 perustuu aineistoon ”Suuret magmaprovinssit ja niiden merkitys maapallon elämän kehityksessä”. Lue ja perehdy aineistoon huolellisesti ja vastaa sen perusteella tehtävän 3 kysymyksiin.

Pohdi seuraavia kysymyksiä lukemasi perusteella. Vastaa omin sanoin ja käytä kokonaisia lauseita.

Tehtävästä 3 voit saada yhteensä 15 pistettä.

Kysymys 3.1

Mitä tarkoitetaan termillä termogeeninen kaasupäästö? (3p)

Kysymys 3.2

Miten suhteessa pieni Laki-purkaus aiheutti pohjoisen pallonpuoliskolla ilmaston viilenemisen kahdeksi vuodeksi, johtaen heikkoihin satoihin ja nälkävuosiin? (Huom. tässä purkauksessa termogeeniset kaasupäästöt olivat olemattomat) (3 p)

Kysymys 3.3

Listaa lukemasi perusteella kolme suuren magmaprovinssin ominaisuutta, jotka saattavat johtaa maailmanlaajuiseen massasukupuuttoon? (3 p)

Kysymys 3.4

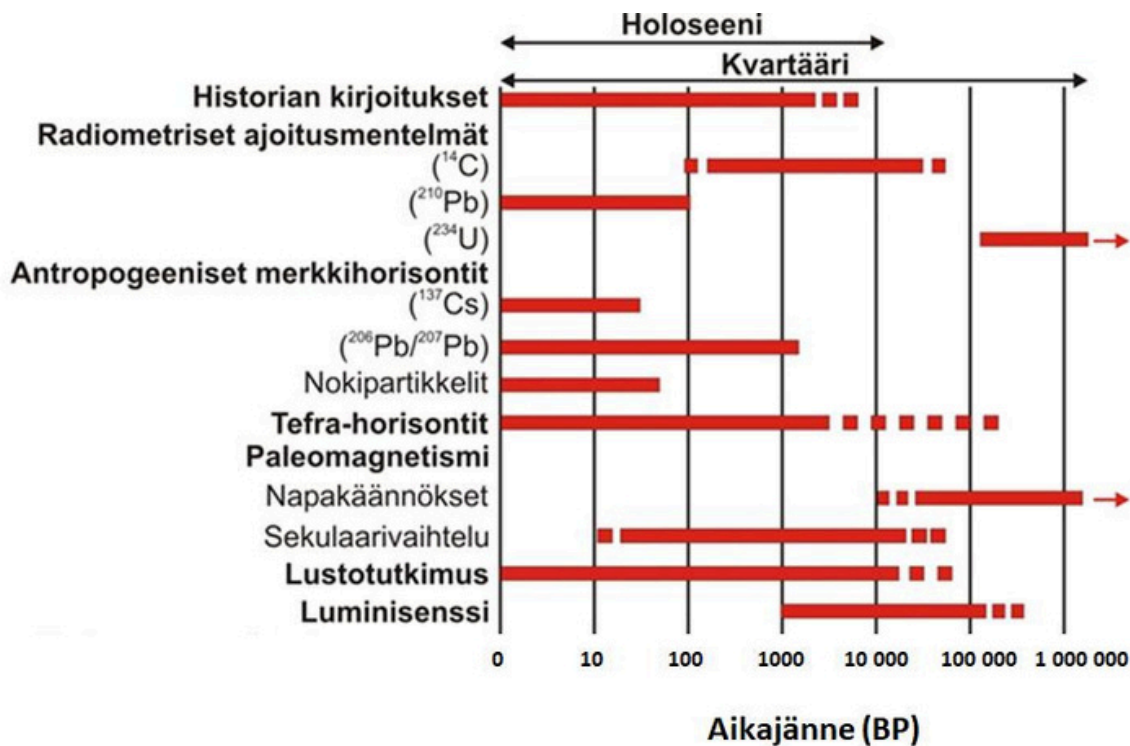
Miksi jotkut suuret magmaprovinssit ovat johtaneet massasukupuuttoihin, mutta toiset eivät? (6 p)

Aineistot

OSA 2, tehtävä 2: Geologisten muodostumien ajoittaminen

Tieto siitä, miten maapallo on kehittynyt lainehtivasta magmamerestä siniseksi planeetaksi mantereineen, on rakentunut muun muassa tutkimalla geologisten muodostumien suhteellisia ja absoluuttisia iäkiä.

Suhteellinen ikä vertailee eri muodostumia toistensa suhteen. Esimerkiksi sedimentti- tai kivilajiyksikkö, joka on toisen päällä, on nuorempi ja muodostunut myöhemmin kuin alkuperäinen kivilaji. **Absoluuttinen ikä** sen sijaan kertoo, kuinka vanha muodostuma on. Kun kahden kiviüksikön tai muodostuman suhde tunnetaan, voidaan tämä tieto yhdistää toisesta kivistä tehtyyn absoluuttiseen iänmääritykseen.



Kuva 2.1 Eri ajoitusmenetelmiä ja niiden aikajänne vuosina ennen nykyaikaa (BP *before present*).

Suhteellisen ja absoluuttisen iän määrittämiseksi on useita ajoitusmenetelmiä. Jos tarkastellaan viimeistä miljoonaa vuotta, huomataan, että menetelmien aikajänne vaihtelee, eikä kata koko ajanjaksoa (Kuva 2.1). Myös ajoittamiseen soveltuva aines eroaa eri menetelmissä. Radiometriset ajoitusmenetelmät tuottavat absoluuttisia iäkiä. Esimerkiksi radiohiiliajoituksessa voidaan käyttää orgaanista ainesta (esimerkiksi puu, hiili, keramiikan kuona, luu, eläinten kuoret ja kollageeni).

Maan pinnalle laskeutuneet ja ajan saatossa syvemmälle sedimentoituneet mikrofossiilit kuten siitepölyt tai ilmvirtausten kuljettama tulivuoren tuhka (niin kutsuttu tefra) taas antavat suhteellisen ajoituksen kerrostumalle. Tefrahorisonttien käyttö ajoitukseen perustuu tulivuoren jokaisen purkauksen tuottaman vulkaanisen lasin yksilölliseen kemialliseen koostumukseen. Niinpä tietyn tulivuorenpurkauksen levittämä vulkaanisen tuhkan kerros voidaan tunnistaa eri geologisista kerrostumista pitkienkin matkojen päässä

purkauksesta. Kun kerrostuma on jossain saatu ajoitettu, saadaan ajoitus myös kaikkialla muualla esiintyvälle samalle kerrostumalle.

Paleomagneettinen ajoitus taas perustuu näytteen magneettisten mineraalien suuntautumiseen suhteessa maan magneettikenttään. Rautapitoiset magneettiset mineraalit kelluvat kiviluolassa ja suuntautuvat maan senhetkisen magneettikentän suuntaiseksi kiviluolan jäähtyessä ja kiven kiteytyessä. Magneettikentän vaihtelussa tapahtuu suuria napakäännöksiä ja pienempiä sekulaarivaihteluita. Esimerkiksi mannerlaattojen ja Fennoskandian kilven liikkeitä on voitu jäljittää käyttämällä paleomagneettista ajoitusta.

Luminisenssijajoitus perustuu puolestaan kiteisen aineen kuten hiekan kvartsi- tai maasälpäraakeiden kidehilan virheisiin, niin sanottuihin elektroniloukkuihin kertyvään sähkövaraukseen luonnollisen radioaktiivisen taustasäteilyn vaikutuksesta. Auringon valo tai kuumentaminen nolaa rakeen kidehilan viritystilan ja kun rae peittyy auringonvalolta (eli sedimentoituu kerrostumaan) tai otetaan käyttöön kuumennuksen (esimerkiksi keramiikan tai tiilen valmistus) jälkeen, kidehilan loukkuihin alkaa hiljalleen kertyä elektronivarausta. Laboratoriossa tämä kiteeseen kertynyt sähkövaraus voidaan vapauttaa ja mitata (valolla tai kuumennuksella), saadaan ajoitus sille, kuinka kauan sitten kerrostuma on muodostunut tai esine valmistettu.

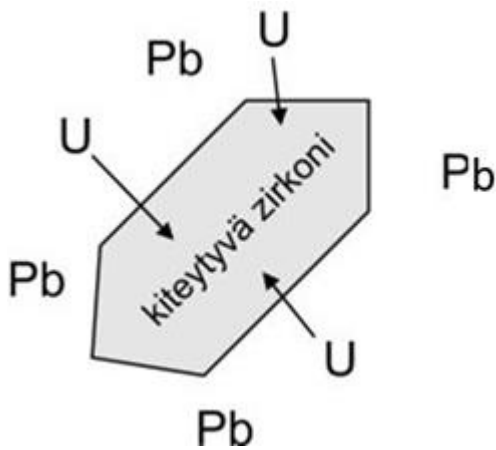
Lustotutkimuksessa voidaan käyttää ns. vuosilustoja, kerrostumassa erottuvia yhden vuoden aikana syntyneitä yksiköitä. Lustoja laskemalla ja niiden paksuuksia mittaamalla ja vertaamalla paksuusvaihtelua toisiin sarjoihin voidaan rakentaa lustokronologia. Lustoja syntyy järvi- ja merisedimentteihin, joissa erottuu tavallisesti kevätkerros vaaleana kerroksena ja tumma, orgaanispitoinen talvikerros. Pohjasedimenttien lustokerrostumat muistuttavat puiden vuosirenkaita. Ne taas syntyvät, kun puiden paksuuskasvukauden loppua kohti solut pienenevät ja vaalean nopeasti kasvavan kevätkerroksen jälkeen syntyy tumma pienisolainen kerros. Puiden lustotutkimuksen avulla syntyy ajoitusmenetelmää nimitetään dendrokronologiaksi.

Geologisessa ajassa tarvitaan useiden satojen ja tuhansien miljoonien vuosien aikajännettä. Kivien absoluuttisen iän määrittämiseen voidaan käyttää useita mineraaleja, mutta hyvin vanhojen kivien ikämäärityksen kannalta parhaimpiin mineraaleihin kuuluu **zirkoni** (kemiallinen kaava: $ZrSiO_4$). Zirkoni on kemiallisesti ja mekaanisesti hyvin kestävä aine, joten kiteet eivät vahingoitu ympäristöoloista helposti. Sen sulamispiste, 900 °C, on korkeampi kuin monilla kivilajeilla, jolloin edes ympäröivän kallion sulaminen ei välttämättä haittaa ajoitusta.

Zirkonista saatu ikä perustuu mineraalirakeesta mitattuihin isotooppisuhteisiin. Kivestä voidaan määrittää yksittäisten zirkonikiteiden ikä. Suomen, ja Euroopan unionin, alueelta löydetty vanhin kivi on Siuruan gneissi, joka on iältään noin 3,5 miljardia vuotta. Vanhimmat maapallolta löydetty zirkonit ovat lähes 4,4 miljardia vuotta vanhoja ja ne ovat löytyneet Australiasta, kuuluisasta Jack Hillsin konglomeraatista. Ajallisesti toisessa päässä maapallon nuorimpia kiviä syntyy koko ajan lisää, kuten vulkaanisesti aktiivisessa Islannissa tai valtamerien keskiselänteillä.

Zirkonin käyttökelpoisuus pohjautuu siihen, että kiteytyessään kiviluolasta, eli magmasta, zirkoni ottaa rakenteeseensa siihen hyvin sopivaa radioaktiivista uraania (U), mutta hylkii uraanin hajoamistuotetta lyijyä (Pb). Siksi voidaan olettaa, ettei tällaisissa kiteissä alun perin ollut lainkaan lyijyä, vaan kaikki siinä oleva lyijy on syntynyt uraanin hajotessa kiteen jo muodostuttua (Kuva 2.2).

Kiteytynyt zirkoni pysyy alle 900°C:ssa suljettuna systeeminä – parhaimmassa tapauksessa kiteytymishetkestä tähän päivään. Ajan kuluessa zirkonissa oleva radioaktiivinen uraani hajoaa määrätyn hajoamissarjan kautta stabiiliksi lyijyksi. Tapahtuma on yksisuuntainen: lyijy ei voi muuttua takaisin uraaniksi.



Kuva 2.2 Zirkonin kiteytyminen magmassa (Lehtonen, E. 2015).

Radioaktiivisten aineiden hajoamista kuvataan **puoliintumisajalla**. Kaikki radiometriset ajoitusmenetelmät, myös aiemmin mainittu radiohiiliajoitus perustuu puoliintumiseen ja tunnettuun puoliintumisaikaan. Radioaktiivisten alkuaineiden puoliintumisajat vaihtelevat. Esimerkiksi uraanin 235-isotoopin puoliintumisaika on 704 miljoonaa vuotta. Tämä tarkoittaa, että yhden puoliintumisajan, eli 704 miljoonan vuoden kuluessa, puolet 235U isotoopista on hajonnut lyijyn isotoopiksi 207Pb. Mittaamalla uraanin ja lyijyn isotooppien määrät, voidaan kiven ikä laskea tiedetyn puoliintumisajan avulla. U-Pb -menetelmällä voidaan ajoittaa näytteitä, joiden ikä vaihtelee yhdestä miljoonasta neljään ja puoleen miljardiin vuoteen.

Lähteet:

Lehtonen E. 2015. *Vihreän kiven arvoitus -blogi*. Sivulla vierailtu 12.2.2024.
<https://vihreakivi.wordpress.com/2015/02/27/kivi-muistaa-ikansa/>

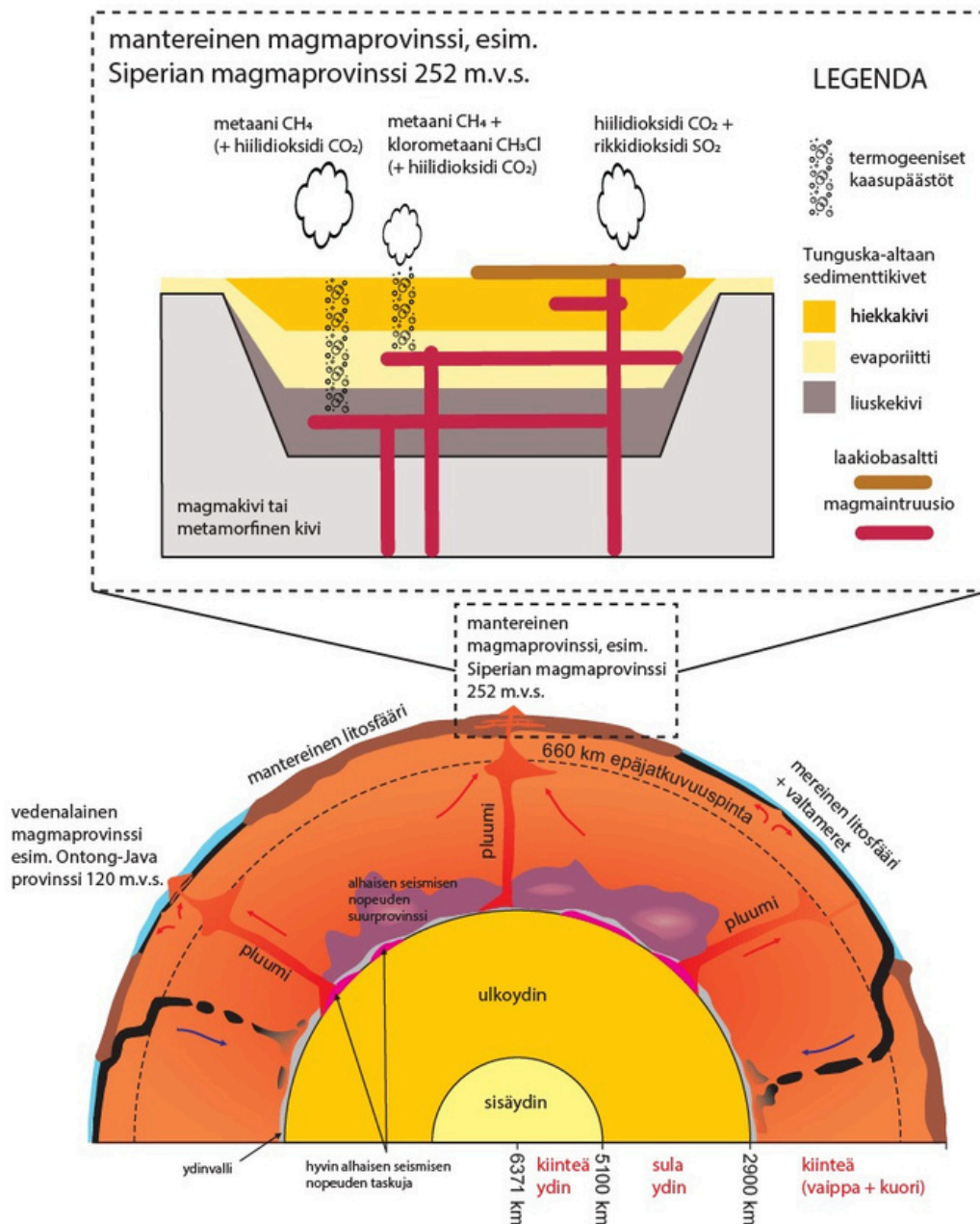
Osa 2, tehtävä 3: Suuret magmaprovinssit ja niiden merkitys maapallon elämän kehityksessä

Kivisulaa eli magmaa syntyy maapallon vaipan sulaessa mannerlaattojen saumakohtissa. Tästä syystä valtaosa aktiivisista tulivuorista sijaitsee alityöntövyöhykkeillä ja valtameriä halkovilla keskiselänteillä. Tulivuoria esiintyy myös mannerlaattojen keskiosissa, joista esimerkkinä Havaijin saaristossa oleva Mauna Kea, joka on ympäröivästä merenpohjasta huipulle mitattuna maailman korkein vuori (9330 m). Näiden 'kuumien pisteiden' synty kaukana mannerlaattojen saumoista voidaan usein selittää syvältä vaipasta kohoavilla, ympäristöään kuumemmilla ja siksi enemmän magmaa tuottavilla plumeilla.

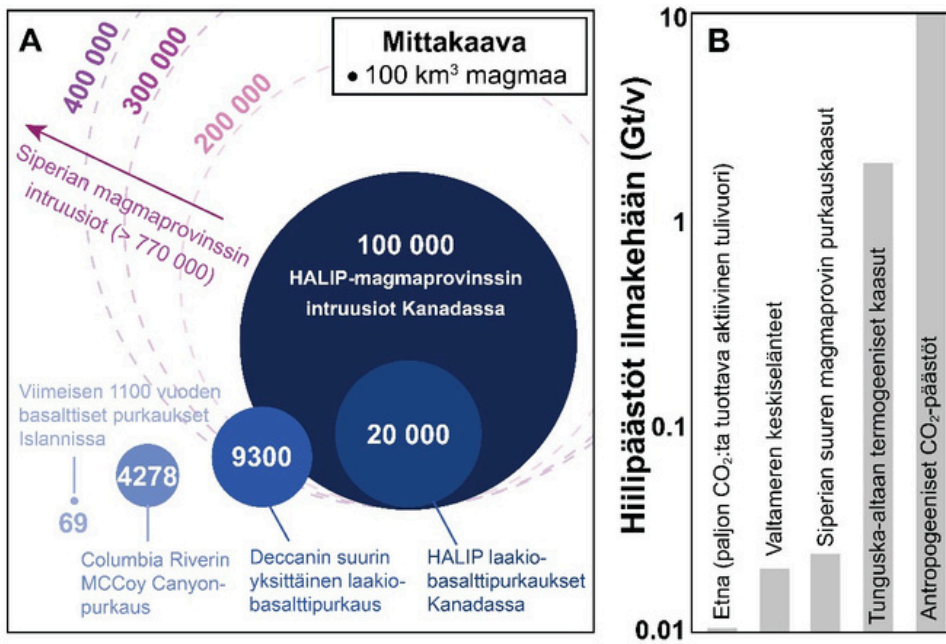
Jokaisena hetkenä kymmeniä tulivuoria purkautuu sekä maan pinnalla että meren pohjassa. On arvioitu, että nykyinen valtameren keskiselänteiden vulkanismi tuottaa uutta mereistä (basaltista) kuorta n. 20 km³ vuodessa, kun taas alityöntövyöhykkeillä ja kuumissa pisteissä purkautuu keskimäärin yhteensä n. 2.5 km³ purkauskiviä vuodessa (Deligne & Sigurdsson 2015). Maapallon geologisesta historiasta löytyy kuitenkin lukuisia ns. suuria magmaprovinssseja, jotka tuottivat geologisesti lyhyessä ajassa (< miljoonan vuoden aikana) valtavia laavakenttiä (ns. laakiobasaltteja) sekä suuren määrän magmaintruusioita kuoren ylimpiin kerroksiin. Jotkut suuret magmaprovinssit purkautuivat mantereiseen kuoreen, ja siksi myös sedimenttikivien läpi. Tärkeä esimerkki on Siperian magmaprovinssi, joka purkautui Tunguska-altaan sedimenttikivien läpi n. 252 miljoonaa vuotta sitten (Kuva 3.1). Toiset magmaprovinssit, kuten Ontong-Java provinssi (n. 120 miljoonaa vuotta sitten), purkautuivat suoraan mereisen kuoren päälle.

Monen suuren magmaprovinssin syntymisen ajatellaan liittyvän voimakkaan vaippapluumin kohoamiseen litosfäärilaatan alle, mikä aiheutti suuren määrän vaipan sulamista. Suurimpien magmaprovinssien purkauskivien kokonaistilavuus ylittää jopa miljooniin kuutiokilometreihin (Kuva 3.2A). Yksittäiset laakiobasalttipurkaukset tuottivat yli 1000 km³ laavaa – sillä peitettäisiin koko Uudenmaa yli sadalla metrillä

laavaa. Näihin verrattuna Islannissa v. 1783–84 purkautunut Laki, joka oli viimeisen tuhannen vuoden suurin basalttinen purkaus maapallolla, vaikuttaa pieneltä. Se tuotti n. 15 km³ purkauskiviä 8 kuukauden aikana.



Kuva 3.1. Maan rakenne (alempi), jossa näkyy ydin, vaippa, mantereinen kuori sekä merellinen kuori. Kivisulan pluumit nousevat pystysuunnassa pintaa kohti ja voivat aiheuttaa nk. suuria magmaprovinseja (ylempi). Kun suuri magmaprovinssi esiintyy mantereisessa ympäristössä, kaasuja vapautuu ilmakehään suoraan magmasta, mutta myös sedimenttikivistä, joiden kautta magma kulkee matkallaan pintaan. Huomaa, että kaasun koostumus riippuu kivityypistä, josta päästö on peräisin. Lyhenne m.v.s. tarkoittaa miljoonaa vuotta sitten. Kuva on muokattu Suomen muinaiset tulivuoret – blogin (Jussi Heinonen, Elina Lehtonen, 2022) ja Svensen et al. 2023 artikkelin mukaan.

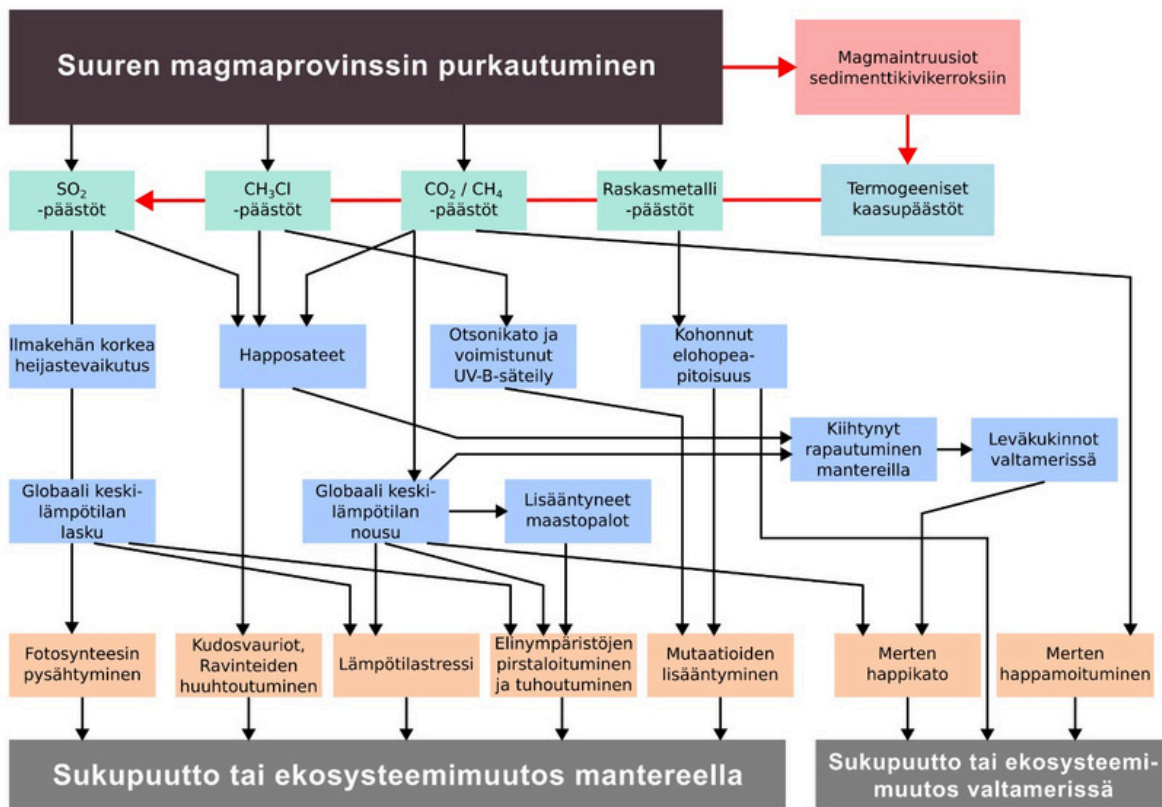


Kuva 3.2 (A) Suurten magmaprovinssien mittasuhteet. Yksittäiset suurissa magmaprovinseissa purkautuneet laavakentät (laakiobasaltit) yltävät tilavuudeltaan tuhansiin kuutiokilometreihin. Siihen verrattuna Islannin kaikki basalttiset purkaukset viimeisen 1100 vuoden aikana ovat tuottaneet vain 69 km³ laavaa. Suurten magmaprovinssien magmaattiset intruusiot saattavat olla tilavuudeltaan pinnalle purkautuneita laavoja suurempia. (B) Vulkaanisten prosessien hiilipäästöt verrattuna antropogeenisiin. Kuva on muokattu Deegan et al. (2023) mukailleen.

Suurten purkausten suurin maailmanlaajuisesti haitallinen seuraus on niiden aikana ilmakehään vapautuvat kaasut. Suuri määrä purkauskaasuja voi vaikuttaa ilmastoon ja riippuen kaasujen kemiallisesta koostumuksesta aiheuttaa joko maailmanlaajuisia lämpenemistä tai viilenemistä ja valtamerten happikatoa ja happamoitumista (Kuva 3.3). Hiilidioksidi (CO₂) ja muut haihtuvat yhdisteet pysyvät syvällä suuren paineen alla liuenneina kivisulaan, mutta vapautuvat ilmakehään, kun magmaan kohdistuva paine laskee purkauksen tuodessa magman pinnalle.

Jotta hiilidioksidilla olisi pitkäaikainen vaikutus ilmastoon, sen pitoisuuden täytyy pysyä koholla tarpeeksi pitkään. On esimerkiksi huomattavaa, että tulivuorten CO₂-päästöt vastaavat tällä hetkellä vain n. 1 % antropogeenisistä eli ihmisperäisistä hiilidioksidipäästöistä (Kuva 3.2B) ja ovat pitkällä aikavälillä tasapainossa muiden kasvihuonekaasuja tuottavien ja sitovien biologisten ja geologisten prosessien kanssa. Esimerkiksi kivien rapautuminen poistaa hiilidioksidia ilmakehästä ja palauttaa sitä valtameriin ja lopulta maankuoreen noin 0,37 Gt/vuodessa. Näin ollen purkausten ja suurten magmaprovinssien ilmastovaikutukset ovat sitä merkittävämpiä mitä nopeammin hiilidioksidipäästöjä syntyy, ja mitä pidempään tämä nopea päästötahti säilyy.

Suurten magmaprovinssien aiheuttamiin ympäristö- ja ilmastovaikutuksiin vaikuttaa olennaisesti laavan purkausvuo. Vaikka magmaprovinssien kestosta ja tilavuudesta laskettu keskimääräinen purkausvuo on vain n. 0.1–1 km³/vuosi, on todennäköistä, että satojen tuhansien vuosien mittaisiin aikakausiin sisältyy aktiivisempia ja hiljaisempia episodeja (Mather & Schmidt, 2021). Esimerkiksi on arvioitu, että Deccanin suuren magmaprovinssin purkausvuo saattoi olla 100–500 vuoden mittaisina aktiivisina kausina jopa 40–240 km³/vuosi (Fendley et al. 2019). Suurien magmaattisten provinssien aktiivisten kausien väleihin saattoi mahtua tuhansien vuosien rauhallisempia kausia. Purkausvuo on puolestaan suorassa yhteydessä myös purkaus- ja termogeenisten kaasujen vapautumisnopeuteen.



Kuva 3.3. Suuren magmaprovinssin purkautumisen ekosysteemivaikutuksia kuvaava vuokaavio (mukailten Grasby & Bond, 2023, Galloway & Lindström 2023)

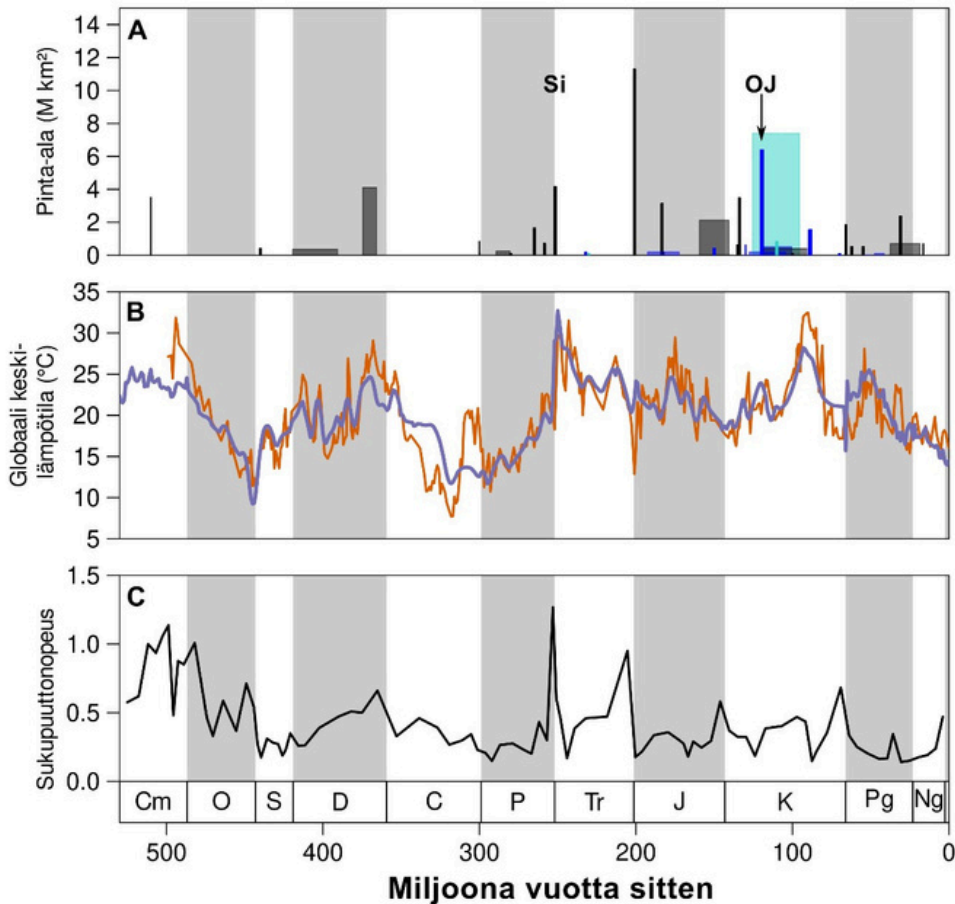
Kuten edellä todettiin, kasvihuonekaasujen vapautumisnopeus on avainmuuttuja, joka sanelee suuren magmaprovinssin mahdolliset ilmastovaikutukset. Nykymaailmassa valtameren keskilämpötilat ovat suurin vulkaanisten CO₂-päästöjen lähde, ja niiden päästöt ovat arviolta 0,02 Gt/v (Kuva 3.2B). Siperian suuren magmaprovinssin purkautumisen aikana n. 252 miljoonaa vuotta sitten magmasta vapautui hiilidioksidia 0,1 Gt/v. Vertailun vuoksi nykyajan ihmisen aiheuttamien CO₂-päästöjen määräksi arvioidaan yli 35 Gt/v.

Geotieteissä on pitkään keskusteltu suurten magmaprovinssien mahdollisista ilmastovaikutuksista, koska arvioidut hiilidioksidin vapautusmäärät purkautuneista laavoista vaikuttavat silti usein liian pieniltä aiheuttamaan pitkäkestoista ilmastomuutosta.

Purkauskasujen tyyppin ja määrän lisäksi suuren magmaprovinssin ympäristö- ja ilmastovaikutuksen laajuuteen vaikuttaa geologinen purkautumisympäristö. Tuliperäisten ja metamorfisten kivien ohella maankuori koostuu myös sedimenttikivistä, jotka ovat syntyneet ns. sedimentaatioalustoissa maan pinnan alavilla alueilla. Joskus suuret magmaprovinssit purkautuvat sedimenttikivistä koostuvaan kallioperään (Kuva 3.1). Nousevan magman on purkautuessaan murtauduttava näiden sedimenttikivien läpi. Huomattava osa magmoista pysähtyy myös kuoreen muodostaen intruusioita. Magmajuonien- ja intruusioiden korkea lämpötila kuumentaa sivukiveä ja voi vapauttaa siitä haitallisia kaasuja. Sedimenttikivistä vapautuneista haihtuvista aineista osa kulkeutuu ilmakehään tuottaen nk. termogeenisiä kaasupäästöjä.

Siperian suuren magmaprovinssin purkautumisen aikana, noin 252 miljoonaa vuotta sitten, arviolta 20 000 Gt hiilidioksidia vapautui suoraan magmasta ilmakehään 200 000 vuoden aikana. On kuitenkin arvioitu, että samana ajanjaksona n. 114 000 Gt CO₂:a vapautui Tunguskan altaan sedimenttikivestä termogeenisinä kaasupäästöinä. Siten sedimenttikivet vaikuttavat olleen Siperian suuren magmaprovinssin pääasiallinen hiilidioksidipäästöjen lähde. Tämä suuri ylimääräinen hiilidioksidin lähde voi olla syy siihen, miksi Siperian suuren magmaprovinssin sijainnilla oli niin voimakas ilmastovaikutus (Kuva 3.2 ja Kuva 3.4A-B). Hiilidioksidin lisäksi purkauksissa magmasta ja sedimenttikivistä vapautuu muitakin kaasuja. Metaani (CH₄) on voimakas kasvihuonekaasu, jota vapautuu nimenomaan liuskekivistä (kuva 3.1). Ilmakehässä rikkidioksidi (SO₂) muodostaa rikkihappoa, joka aiheuttaa happosateita, sekä aerosoleja, joilla on lyhytaikainen

(muutaman vuoden) ilmasto viilentävä vaikutus. Lisäksi halogeenikaasut (esim. CH₃Cl) ohentavat otsonikerrosta, joka suojaa maan pintaa ja elämää auringon ultraviolettisäteilyltä.



Kuva 3.4 Suurten magmaprovinssien yhteys ilmastonmuutokseen ja sukupuuttoihin. A: Suuren magmaprovinssin purkausalueen pinta-ala. Pylvään paksuus kuvaa purkauksen ajallista kestoa. Pylvään väri puolestaan kuvaa purkausympäristöä. Musta/tummanharmaa pylväs: purkaus tapahtui mantereella; sininen pylväs: purkaus tapahtui merellisen kuoren päälle; turkoosi pylväs: purkaus tapahtui osin mantereella osin merellisen kuoren päälle. Kuvaan on esimerkkeinä merkitty myös Siperian (Si) ja Ontong-Javan (OJ) suuret magmaprovinssit (Ernst et al. 2021). B: Kaksi eri menetelmiin perustuvaa globaalin keskilämpötilan rekonstruktioita (Scotese et al. 2021; Shaviv et al. 2023). C: Sukupuuttoonopeus valtamerissä (Kocsis et al. 2019). Vaikka kuvaaja esittääkin sukupuuttoja meriekosysteemeissä, se kuvastaa sukupuuttojen ajankohtia ja voimakkuutta myös mantereilla.

Viime vuosikymmenten parantuneiden iänmäärittäminen avulla pystytään osoittamaan, että suurten magmaprovinssien purkaukset ovat yhteydessä lähes kaikkien merkittävien biologisten kriisien kanssa maapallon elämän historiassa. Permikauden lopulla n. 252 miljoonaa vuotta sitten tapahtunut kaikkein suurin viidestä suuresta massasukupuutosta on liitetty Siperian suuren magmaprovinssin purkautumiseen (Kuva 3.4). Tuolloin 80–96 % merissä elävistä lajeista ja n. 70 % maalla elävistä lajeista kuoli sukupuuttoon. Esimerkiksi nelijalkais- (tetrapodi) heimojen lukumäärä ennen permikauden massasukupuuttoa oli 40. Sukupuuttoaallon myötä heimojen määrä putosi kymmeneen.

Suuren magmaprovinssin purkauksella itsessään on vain suhteellisen paikallisia vaikutuksia, vaikka niiden pinta-ala voikin olla valtavan suuri. Globaalin tason ympäristömuutoksen kuitenkin aiheuttavat purkauksiin liittyvät päästöt (Kuva 3.3). Purkauksissa magmasta ja sedimenttikivistä vapautuvat kasviuunikaasut lämmittävät ilmasto globaalisti, mikä vaikuttaa eliöiden lämpötilastressiin, muuttaa elinympäristöjä mantereilla, lisää maastopalojen määrää ja siten edelleen pirstoo tai tuhoaa elinympäristöjä.

Kasvihuonekaasujen lisäksi purkauksissa vapautuu runsaasti rikkidioksidia. Se voi lyhytaikaisesti lisätä ilmakehän heijastekykä ja voi siten viilentää ilmastoa. Myös tämä vaikuttaa eliöiden lämpötilastressiin ja elinympäristöjen häviämiseen. Vaikka rikkidioksidilla ei olisikaan pitkäkestoista vaikutusta ilmastoon, kohonneet rikkidioksidipitoisuudet lisäävät haposateiden määrää, mikä puolestaan happamoittaa maaperää. Purkausten yhteydessä voi vapautua myös nk. halogeenikaasuja (esim. CH₃Cl) ja raskasmetalleja kuten elohopeaa. Halogeenit tuhoavat ilmakehän otsonia, mikä puolestaan voimistaa auringon ultraviolettisäteilyä maanpinnalla ja lisää mutaatioiden määrää. Suurten magmaprovinssien purkausten aikaan ajoittuvista sedimenttikivistä talteen saaduissa kasvien siitepölyhiukkasissa on usein havaittavissa selviä mutaatioita, jotka ovat käytännössä tehneet kasveista steriilejä. Myös sedimenteissä havaitut myrkylliset elohopeapitoisuudet ovat voineet aiheuttaa haitallisia mutaatioita.

Meriekosysteemeissä lämpötilan nousu vähentää meriveden kykyä liuottaa happea, kun taas ilmakehän hiilidioksidin osapaineen kasvu lisää hiilidioksidin liukenemista meriveteen, jolloin syntyy hiilihappoa, mikä puolestaan johtaa valtameren pH:n laskuun (Kuva 3.3). Valtamerten vähähappisia tai hapettomia vaiheita havaitaan suurten magmaprovinssien purkausten yhteydessä. Nämä voivat vaihdella ajanjaksoista, jolloin vähähappiset alueet merissä laajenevat, ajanjaksoihin, jolloin hapettomat ja sulfidipitoiset olosuhteet ulottuivat ylimpiin vesikerrokseen asti. Kun vähähappiset olosuhteet levittäytyvät merien pohja-alueilta mannerjalustoille, joissa pääosa monimutkaisista elämänmuodoista elää, valtameret muuttuvat nopeasti autiomaiksi, jotka sopivat vain mikrobielämälle. Hapettomien ja sulfidipitoisten olosuhteiden muodostuminen ja laajeneminen on erittäin tuhoisaa useimmille monimutkaisille elämänmuodoille ja luo olosuhteet, jotka muistuttavat prekambria valtameriä.

Suurten magmaprovinssien purkautumisen aiheuttamiin biologisiin kriiseihin liittyy vielä eräs mielenkiintoinen piirre. Kun tutkitaan välittömästi tällaisen kriisin (esim. massasukupuutto) jälkeiseen aikaan ajoittuvia sedimenttikiviä ja niihin tallentuneita fossiilaineistoja, voidaan havaita voimakas itiökasvien kuten sanikkaisten ja sammalien itiöiden (myöhemmin myös koppisiemenisten kasvien siitepölyn) määrän kasvu. Tämä näkyy aikasarja-aineistoissa voimakkaana itiöpiikkinä. Nämä itiöpiikit heijastavat opportunististen pioneerilajien populaatioiden kasvua ja levittäytymistä vastikään voimakkaasta häiriöstä kärsineeseen ympäristöön, josta muu kasvillisuus on pääosin tuhoutunut. Tällaiset pioneerilajien itiö- tai siitepölypiikit kuvastavat normaalin ekologisen suksession ensimmäistä vaihetta. Massasukupuuttoihin liitettävät itiöpiikit voidaan kuitenkin havaita globaalisti, mikä kuvastaa itiöpiikkiä edeltävän häiriön voimakkuutta ja laajuutta. Samalla itiöpiikit kertovat myös elämän sitkeydestä ja kyvystä toipua katastrofaaliseltakin vaikuttavasta kriisistä.

Lähteet:

Deegan, F. M., Callegaro, S., Davies, J. H., & Svensen, H. H. (2023). Driving global change one LIP at a time. *Elements*, 19(5), 269-275.

Deligne, N. I., & Sigurdsson, H. (2015). Global rates of volcanism and volcanic episodes. In *The encyclopedia of volcanoes* (pp. 265-272). Academic Press.

Ernst, R. E., Bond, D. P. G., Zhang, S.-H., Buchan, K. L., Grasby, S. E., Youbi, N., El Bilali, H., Bekker, A., Doucet, L. S. (2021). Large Igneous Province Record Through Time and Implications for Secular Environmental Changes and Geological Time-Scale Boundaries, in: *Large Igneous Provinces*. American Geophysical Union (AGU), 1–26.

Fendley, I. M., Mittal, T., Sprain, C. J., Marvin-DiPasquale, M., Tobin, T. S., & Renne, P. R. (2019). Constraints on the volume and rate of Deccan Traps flood basalt eruptions using a combination of high-resolution terrestrial mercury records and geochemical box models. *Earth and Planetary Science Letters*, 524, 115721.

Galloway, J. M., & Lindström, S. (2023). Impacts of Large-scale Magmatism on Land Plant Ecosystems. *Elements*, 19(5), 289–295.

Grasby, S. E., & Bond, D. P. G. (2023). How Large Igneous Provinces Have Killed Most Life on Earth—Numerous Times. *Elements*, 19(5), 276–281.

Heinonen, J. & Lehtonen, E. (2022). *Suomen muinaiset tulivuoret –blogi*. Sivulla vierailtu 26.2.2024.
<https://www.tulivuoret.net/>

Kocsis, Á. T., Reddin, C. J., Alroy, J., Kiessling, W. (2019). The r package divDyn for quantifying diversity dynamics using fossil sampling data. *Methods in Ecology and Evolution* 10, 735–743.

Mather, T. A., & Schmidt, A. (2021). Environmental effects of volcanic volatile fluxes from subaerial large igneous provinces. *Large igneous provinces: A driver of global environmental and biotic changes*, 103-116.

Scotese, C. R., Song, H., Mills, B. J. W., van der Meer, D. G. (2021). Phanerozoic paleotemperatures: The earth's changing climate during the last 540 million years. *Earth-Science Reviews* 215, 103503.

Shaviv, N. J., Svensmark, H., Veizer, J. (2023). The Phanerozoic climate. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1519, 7–19.

Svensen H.H, Jones, M.T., Mather, T.A. (2023) Large Igneous Provinces and the Release of Thermogenic Volatiles from Sedimentary Basins. *Elements*, 19(5), 282–288.