



Mitä tapahtuu, jos mannerjäät sulavat?

Juhani Kakkuri

Yleisimmät kauhuskenaariot ilmastomuutoksen vaikutuksista liittyvät jäätiköiden sulamiseen. Usein arvellaan, että merenpinta nousisi tänä päivänä nopeasti ja että matalat rannat peittyisivät tulvivaan mereen. Jäätiköt eivät kuitenkaan sula nopeasti eivätkä suoraviivaisesti. Mutta entä jos globaalinen lämpötila jatkaa nousuaan nykyisellä vauhdilla, mitä silloin tapahtuu Etelämantereen tai Grönlannin mannerjäätiköille. Voiko sulaminen voikäynnistyä toden teolla? Ja jos voi, niin mitä silloin tapahtuu?



Maapallon ilmastovaihtelut tunnetaan geologisten tutkimusten perusteella pitkältä ajalta. Merenpohjan sedimenttien ja jäätiköiden kairaustuloksista voidaan esimerkiksi päätellä, että viimeisten 800 000 vuoden aikana kylmät ja lämpimät ajat ovat vuoron perään seuranneet toisiaan. Kylmien jaksojen pituus on ollut noin 90 000 vuotta ja lämpimien jaksojen pituus selvästi lyhyempi, noin 10 000 vuotta. Puiden lustotutkimukset puolestaan osoittavat, että maapallon lämpötila on viime jääkauden jälkeen vaihdellut hyvinkin nopeasti 1 - 2 asteen rajoissa. Teollistumisen vaikutus alkaa näkyä 1800-luvun lopulta lähtien, jolloin keskilämpötilat kääntyivät nousuun. Nousu ei kuitenkaan jatkunut suoraviivaisesti vaan oli välillä pysähdyksissä, kuten vielä toisen maailmansodan jälkeenkäin usean vuosikymmenen ajan. Vasta sen jälkeen keskilämpötilat ovat nousseet jyrkästi. Sääolojen analyysi osoittaa lisäksi, että pohjoisen ja eteläisen pallonpuoliskon keskilämpötilat ovat vaihdelleet eri rytmillä.

UNESCO ja kansainvälinen ilmatieteen järjestö WMO käynnistivät 1980-luvun lopulla laajan ilmaston tilaa koskevan selvityksen. Työtä johti eri maiden hallitusten asettama kansainvälinen ilmastopaneeli IPCC. Sen työryhmät julkaisivat raportteja, joissa tarkasteltiin ilmastossa viime vuosikymmeninä tapahtunutta kehitystä ja esiteltiin sadan vuoden tähtäyksellä laskennallisiin malleihin perustuvia ennusteita ilmaston tulevasta kehityksestä. Pessimistisimmän ennusteen mukaan maapallon keskilämpö kasvaa sadassa vuodessa noin 6 C.

Koko 1990-luvun ilmastokeskustelun keskeisenä kysymyksenä on ollut ihmisen osuus globaalisen lämpötilan kasvussa. Ensimmäinen IPCC:n raportti suhtautui asiaan varovasti. Jotkut tieteelliset analyysit näyttivät osoittavan, että ihmisen toiminnan aiheuttaman ja luonnollisen vaihtelun erottaminen toisistaan olisi mahdollista vasta 2035-2040. Vuonna 1995 ilmestyneessä raportissaan IPCC:n tutkijat kuitenkin jo katsoivat, että oli olemassa riittävästi näyttöä ihmistoiminnan osuudesta maapallon lämpötilan kasvuun.

Yleisimmät kauhuskenaariot ilmastomuutoksen vaikutuksista liittyvät jäätiköiden sulamiseen. Luullaan, että merenpinta nousee nopeasti ja että matalat rannat peittyvät tulvivaan mereen.

Maapallon vesivaroista noin 2,2 % eli noin 32,5 miljoonaa kuutiokilometriä on jäässä tai lumena. Se on 1/42 maapallon merten vesimäärästä. Eri jäätiköiden kesken se jakautuu seuraavasti:

Taulukko 1. Maapallon jäätiköt ja ekvivalentti merenpinnan nousu.

Jäätikkö	Tilavuus (miljoonaa km ³)	Vesikerroksen paksuus (m)
Etelämanner	27,9 - 29,3	77,2 - 81,3
Grönlanti	2,5 - 3,0	6,9 - 8,3
Muut	0,2	0,6

Taulukon mukaan Etelämantereen vesiarvo maailman meriin tasapaksuksi kerrokseksi levitettynä on noin 80 metriä ja Grönlannin noin 8 metriä. Pienehköjä jäätiköitä on nykyisin mm. Islannissa, Kanadan arktisilla alueilla ja Pohjoisen jäämeren



saarilla sekä maapallon korkeimmissa vuoristoissa. Näiden vesiarvo on yhteensä noin 60 cm.

Jäätikön synty

Jos talvella satanut lumi ei syystä tai toisesta ehdi sulaa kesän aikana, alkaa jäätikön muodostuminen. Jatkuvasti kertyvästä lumesta syntyy aluksi karkearakeista lumijäättä eli firmiä. Se muuttuu syvemmällä paineen vaikutuksesta läpikuultavaksi jäättikköjääksi. Pohjimmaisissa keroksissa jää muuttuu plastiseksi ja alkaa virrata alustan pinnanmuodoista riippuen joko kielekkeinä tai tasaisena virtana.

Jäätiköissä erotetaan tavallisesti kasautumis- eli *akkumulaatioalue* ja vähenemis- eli *ablaatioalue*. Akkumulaatioalue on se lumirajan yläpuolella oleva osa jäättikköä, jonne kertyy jatkuvasti uutta lunta. Ablaatioalueella jäätä häviää sekä sulamalla että haihtumalla. Mikäli akkumulaatio on nopeampaa kuin ablaatio, jäättikkö etenee. Päinvastaisessa tapauksessa se peräytyy.

Jäävuoria syntyy mereen työntyvien jäätiköiden reunoilla. Syynä on meriveden noste, joka irroittaa liian syväälle ulottuvan kielekkeen. Pohjoisella pallonpuoliskolla jäävuoria syntyy etenkin Grönlannin ja Frans Joosefin maan jääkielekkeistä. Valtaosa Grönlannin mannerjäätikön poikimista jäävuorista ajautuu Labradorinvirran kuljettamana Davisin salmea pitkin New Founlandin rannikon edustalle ja siitä edelleen Kanadan rannikon editse kauas etelään. Eteläisin havainto on Bermudalta, joka sijaitsee 30. pohjoisella leveyspiirillä.

Etelämanner poikii jäävuoria huomattavasti enemmän kuin Grönlanti, jopa 50 000 vuorta vuodessa. Mantereesta irtoavat jäävuoret ovat toisinaan hyvin suuria, kuten se suunnaton vuori, joka irtosi Rossin meren reunasta kesällä 2000. Se oli Jamaikan saaren kokoinen, lähes 300 km pitkä ja 17 km leveä jäälautta, jonka sulaminen kestänee seuraavat 50 vuotta. Etelämantereesta irtoavat jäävuoret ovat yleensäkin melko pitkäikäisiä. Tämä johtuu mannerta kiertävästä kylmästä merivirrasta, joka pitää jäät mantereen tuntumassa. Vain jokunen harva onnistuu ylittämään virran ja ajautuu pohjoisemmille vesille. Pohjoisin havainto on 26. eteläiseltä leveyspiiriltä.

Kun jäättikkö sulaa

Jäättiköt eivät kuitenkaan sula nopeasti eivätkä suoraviivaisesti. Etelämanner tarjoaa tästä parhaan esimerkin. Jos nimittäin ilmasto lämpenee, lämpenee myös Etelämannerta ympäröivän meriveden lämpötila. Tämä kiihdyttää haihduntaa kyseisellä merialueella ja lisää pilvisyyttä ja sateisuutta. Alueelle ominaiset tuulet siirtävät kosteata ilmaa Etelämantereen yläpuolelle, ja koska siellä vallitsee kylmä ilmasto, kosteus sataa lumena alas. Jäättikön massa kasvaa siitä syystä. Ilmaston lämpeneminen ei siis ainakaan aluksi aiheuta jäätikön sulamista vaan päinvastoin lisää sen massaa.

Tilanne voi kuitenkin muuttua, jos lämpötila kohoaa riittävästi. Lisääntyvän jäämassan paino aiheuttaa jäätikön pohjalla sulamista. Missä lämpimämpi merivesi kohtaa jäätikön reunan, siellä reunan lohkeilu nopeutuu. Jos maapallon keskilämpötila jatkaa nousuaan, mantereiden massatase kääntyy negatiiviseksi ja poistuva jää alkaa nostaa merenpintaa. Koko prosessi on monimutkainen ja kestää kauan, tuhansia, jopa kymmeniä tuhansia vuosia. Esimerkiksi Fennoskandian mannerjäätikön sulamisvaihe kesti 10 000 vuotta.

Jäättiköiden muutosten aikamittakaavaa on syytä tarkastella erikseen. Massan kiertoaika, jolla tarkoitetaan jäätikön koko massan uudistumiseen kuluvaa aikaa, on Grönlannilla 5 000 vuotta ja Etelämantereella 15 000 vuotta. Ilmastomuutosten kannalta ns. dynaaminen vasteaika on kuitenkin tärkeämpi kuin kiertoaika. Vasteajalla tarkoitetaan reaktioaikaa, jonka kuluessa muutokset näkyvät. Esimerkiksi jos maapallon keskilämpötila alkaa muuttua, kuluu keskimäärin vasteajan pituinen aika, ennenkuin muutokset jäätikön koossa, ominaisuuksissa ja paksuudessa alkavat näkyä. Jäättiköt reagoivat ilmaston muutoksiin hitaasti, pitkällä viiveellä, mikä johtuu prosessien monimutkaisuudesta ja hitaasta käynnistymisestä.



Nykyinen tilanne

Vuoristorajäätiköillä dynaaminen vasteaika on melko lyhyt, noin 10-100 vuotta, mannerjäätiköillä sitä vastoin pitkä, Grönlannilla 1 000-10 000 vuotta, Etelämantereen länsiosalla 100 -1 000 vuotta ja itäosalla 10 000-100 000 vuotta. Vuoristorajäätiköt reagoivat siis nopeasti ilmaston lämpenemiseen, mannerjäätiköt sitä vastoin pitkällä viiveellä. Tämä on sopusoinnussa havaintojen kanssa. Kun näet kuutisensataa vuotta kestänyt ns. pieni jääkausi päättyi 1800-luvun puolivälissä, ilmasto alkoi lämmentä. Pian sen jälkeen vuoristorajäätiköt alkoivat sulaa ja merien pinta nousta osaksi vesimäärän lisääntymisen, osaksi veden lämpölaajenemisen johdosta.



Merenpinnan nousu on ollut noin 1 mm/a lähes koko 1900-luvun ajan. Viime vuosina se on nopeutunut ja lienee tällä hetkellä 1,5-2 mm/a. Siitä yli puolet johtuu kansainvälisen ilmastopaneelin raporttien mukaan meriveden lämpölaajenemisesta, loput lähes yksinomaisesti vuoristorajäätiköiden sulamisesta. Lämpölaajeneminen tullee samojen raporttien mukaan olemaan merenpinnan nousun pääasiallinen aiheuttaja vielä vuosisatojen ajan.



Grönlannin ja Etelämantereen jäämassojen nykyisestä sulamistilanteesta ei sitä vastoin voida sanoa sitä eikä tätä. Kumpikin jäätikkö on liian suuri, jotta hitaat muutokset voisivat niissä lyhyellä aikavälillä näkyä. Mittaustarkkuuden rajoissa ne eivät siis tällä hetkellä näytä kasvavan eivätkä pienenevän, ts. jään kertymä on niissä tasapainossa poistuman kanssa. Yksityiskohdissa on kuitenkin eroja. Etelämantereella jään sulaminen on lähes olematonta, joten tasapaino johtuu lohkeilusta, joka vastaa kertymän suuruutta. Grönlannissa sulaminen on samaa kertaluokkaa kuin lohkeilu. Lisäksi jään kertyminen on Grönlannissa jäätikön volyymiin nähden nopeampaa kuin Etelämantereella.



Mitä tapahtuu, jos Grönlanti sulaa?

Jos globaalinen lämpötila jatkaa nousuaan nykyisellä vauhdilla, Grönlannin mannerjäätikön sulaminen voi käynnistyä toden teolla. Koska sulamisajaksi voidaan perustellusti olettaa 3 000-4 000 vuotta, nostavat sulamisvedet valtameren pintaa keskimäärin 2 mm/a. Vedenpinta ei kuitenkaan nouse samalla nopeudella kaikissa merissä. Tämä johtuu ns. geoidin, so. merenpinnan likiarvon, muodonmuutoksesta, jonka jään poistuma välittömästi aiheuttaa. Mannerjäätiköllä on näet oma vetovoimansa, jolla se kiskoo merivettä puoleensa. Kun tämä sulamisen vuoksi häviää, merenpinta laskee jäätikön välittömässä läheisyydessä. Toronton yliopistossa tehtyjen laskelmien mukaan se alenee hitaasti (0,1-0,2 mm/a) myös Jäämerellä ja pohjoisella Atlantilla. Itämeren alueella se nousee hitaasti, keskimäärin 0,2 mm/a, siis 2 senttiä 100 vuodessa. Etäällä sulavasta jäätiköstä, etenkin Atlantin valtameren eteläosassa, Intian valtamerellä ja Tyynellä valtamerellä, se sen sijaan nousee globaalia keskiarvoaan nopeammin (2,4-2,6 mm/a). Laskelmassa maankuoren elastisuus on otettu huomioon.




Grönlannin sulamiseen liittyy monta muutakin ilmiötä. Niistä tärkein on maankuoren isostaattinen deformaatio. Maankuori, jonka mannerjään valtava massa on jääkauden aikana painanut lommolle, alkaa oieta, kun jääkuorma poistuu. Oi'istumisvaihe, jonka aikana maa kohoaa useita satoja metrejä, kestää tuhansia vuosia. Toisaalla meriin kertyneet sulamisvedet kuormittavat merenpohjaa, joka vuorostaan painuu lommolle, ja valtameret alkavat syvetä. Mantereet kohoavat vastaavan määrän, jotta isostaattinen tasapaino säilyisi merten ja mannerten välillä. Vedenpinnan nousu jää tästä johtuen rannikoilla laskettuakin vähäisemmäksi.




Entä Etelämanter, mitä sen sulamisesta voisi seurata?

Etelämantereen sulaminen tulevien vuosituhsien aikana on sitä vastoin epätodennäköistä. Osittain se johtuu kylmästä länsituulten virrasta, joka kiertää mannerta ja eristää sen lämpimistä merialueista. Keskilämpötilojen pitäisi nousta nykyisestä tasostaan ainakin 20C, jotta sulaminen voisi






käynnistyä. Niin korkealla lämpötilojen ei tiedetä olleen kertaakaan miljooniin vuosiin. Jäätikön massiivinen itäosa, joka alkoi muodostua 35-37 miljoonaa vuotta sitten, on näet ollut pysyvä ainakin 13 miljoonaa vuotta. Pienempi länsiosa, joka muodostui erikseen, on sekin ollut pysyvä jo noin 4,5 miljoonaa vuotta.



Jos Etelämantereen jääpeite kuitenkin vastoin kaikkia odotuksia sulaisi kokonaan tai ainakin osittain, muuttuisi maapallon muoto jonkin verran. Tämä johtuisi jäätikön vetovoiman poistumisesta, jonka seurauksena merenpinnan (geoidin) muoto muuttuisi ja yli puolet sulamisvesistä kasaantuisi pohjoisen pallonpuoliskon meriin. Lisävesien painosta merenpohja alkaisi painua periksi antavaan vaippaan ja mantereet alkaisivat kohota. Suomalaisyyntyisen Purduen yliopiston geodesian professorin *Lassi Kiviojan* esimerkkilaskelma osoittaa, että jos Etelämantereesta siirrettäisiin valtameriin 65 metrin paksuista kerrosta vastaava vesimäärä, syvenisivät meret keskimäärin 15 metriä, mutta koska merenpohjia kevyemmät mantereet kohoaisivat samanaikaisesti 35-40 metriä, jäisi merenpinnan nousuksi mannerten reunoilla loppujen lopuksi vain noin 10-15 metriä. Laskelmassa edellytetään, että Etelämantereen sulaminen kestäisi kauan, esimerkiksi 10 000 vuotta, jotta mantereet ja merenpohjat pysyisivät muutosten tahdissa mukana.




Ei suurempaa hätää



Kauhukuvat äkillisestä merenpinnan noususta ovat edellä esitetyn perusteella rajusti ylimitoitettuja. Etelämanter ei näet voine sulaa lainkaan, vuoristojäätiköt ja Grönlanti sitä vastoin voivat. Niiden sulamisesta ei kuitenkaan aiheudu äkillistä vedenpinnan nousua, verkkaista nousua kylläkin, mutta koska kaikki tapahtuu hitaasti, ihmis-, eläin- ja kasvikkunnalla on riittävästi aikaa mukautua muuttuviin oloihin.




KIRJALLISUUTTA



Albritton, D. L. et al.: *Technical Summary of the IPCC Working Group I Report*. Pp. 21-83.


Houghton, J. (1994): *Global Warming*. Cambridge University Press.

Eronen, M. (1991): *Jääkausien jäljillä*. Ursan julkaisuja 43.




Kakkuri, J. ja S.-E. Hjelt (2000): *Ympäristö ja geofysiikka*. Ursan julkaisuja 76.

Kivioja, L. A (1967): "Effects of mass transfers between land-supported ice caps and oceans on the shape of the earth and on the observed mean sea level." *Bull. Geod.* 1967, 281-288.



Mitrovica, J. X., M. E. Tamicea, J. L. Davis and G. A. Milne (2001): "Recent mass balance of polar ice sheets inferred from patterns of global sea-level change." *Nature*, vol. 409, 1026-1029.

Taipale, K. ja M. Saarnisto (1991): *Tulivuorista jääkausiin. Suomen maankamaran kehitys*. WSOY.



Kirjoittaja on geodeettisen laitoksen emeritus ylijohtaja ja professori. Kirjoitus perustuu Tieteellisten seurain valtuuskunnan luentosarjaan Turun kirjamesseilla 6.10.

Häneltä on tänä vuonna ilmestynyt tätä teemaa käsittelevä teos "Ympäristö ja geofysiikka" (Juhani Kakkuri ja Sven-Erik Hjelt, Tähtitieteellinen yhdistys Urso 2001).