

Lämpenemisen vaikutukset maapallon muodossa ja merenpinnan korkeudessa

Juhani Kakkuri

Geodeettinen laitos
Geodeetinrinne 2, 02430 Masala
Juhani.Kakkuri@fgi.fi

Tiivistelmä. Globaali-ilmastosta on viimeaikoina lämmennyt nopeasti, itse asiassa nopeammin kuin kertaakaan jääkauden päättymisen jälkeen, ja sääolot ovat lämpenemisen myötä selvästi muuttuneet. Luotettavien tilastojen mukaan keskilämpötilat ovat kahdennellakymmenennellä vuosisadalla nousseet maailmanlaajuisesti noin 0,6 astetta. Nousu ei kuitenkaan ole ollut suoraviivaista vaan on välillä ollut pysähdyksissä, kuten vielä toisen maailmansodan päättymisen jälkeenkin parin kolmen vuosikymmenen ajan. Sen jälkeen keskilämpötilat ovat nousseet jyrkästi: 1990-luku oli maailmanlaajuisesti lämpimin vuosikymmen ja vuosi 1998 lämpimin yksittäinen vuosi sitten vuoden 1861, josta alkaen luotettavia lämpötilan mittauksia on tehty eri puolilla maailmaa. Vuoden 2002 elokuu lienee ollut ainakin Suomessa lämpimin elokuu sataan vuoteen ja Eurooppaa runnelleet tulvat joidenkin tilastojen mukaan pahimmat 500 vuoteen. Tuoreessa muistissa on äskettäin New Orleansin tuhonnut hirmumyrsky Katriina, jonka aiheuttamat vahingot on arvioitu 18 miljardiksi dollariksi.

Lämpenemisen syynä on hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin IPCC:n mukaan ollut kasvihuonekaasujen, etenkin hiilidioksidin lisääntyminen ilmakehässä. Tämä on aiheuttanut niin sanotun kasvihuoneilmaston voimistumista. Paneelin julkaisemien ennusteiden mukaan lämpeneminen jatkuu alkaneella vuosisadalla yhä kiihtyvällä nopeudella, samoin lämpötilojen nousu siten, että keskilämpötilat ovat 100 vuoden kuluttua 1,4–5,8 °C korkeammat kuin nykyisin. Merenpinnan nousuksi paneeli povaa 20–80 cm. Ennusteet ovat kuitenkin epävarmoja, eikä tiedetä tarkasti, kuinka nopeasti kasvihuonekaasut lisääntyvät ilmakehässä alkaneella vuosisadalla. Myös ennustajien ilmastomalleissa lienee kehittämisen varaa.

1 Maapallomme jäätiköt

Nykyisten jäätiköiden pinta-ala on yhteensä 15,9 miljoonaa neliökilometriä. Niistä Etelämannerta ja Grönlantia peittävien mannerjäätiköiden osuus on 15,3 miljoonaa neliökilometriä eli 96,2 %. Muut jäätiköt, joita on Kanadan arktisilla alueilla, Alaskassa, Islannissa ja Jäämeren saarilla samoin kuin lauhkeiden ja lämpimien seutujen vuoristoalueilla, ovat pinta-alaltaan pieniä, yhteensä vain noin 0,6 miljoonaa neliökilometriä eli 3,8 % kaikkien jäätiköiden pinta-alasta. Tilavuuksiltaan mannerjäätiköt ovat jättiläisiä muihin jäätiköihin verrattuna: Etelämannerta arviointitavasta riippuen 27,9–29,3 miljoonaa kuutiokilometriä ja Grönlanti 2,5–3,0 miljoonaa kuutiokilometriä. Muiden jäätiköiden tilavuus on yhteensä noin 0,2 miljoonaa kuutiokilometriä. Maapallon vesivarjoista on siis nykyisin 30,6–32,5 miljoonaa kuutiokilometriä jäänä ja lumena. Se on runsaat 2 % merien vesimäärästä. Jos se olisi vetenä, joka levitetäisiin tasapaksuiksi kerroksiksi kaikkiihin valtameriin, olisi kerroksen paksuus 84,7–90,2 metriä, josta Etelämannerteen osuutta olisi 77,2–81,3 metriä, Grönlannin osuutta 6,9–8,3 metriä ja kaikkien muiden jäätiköiden osuutta 0,6 metriä.

2 Jäätiköt sulavat

Lämpenemisen vaikutuksesta maapallomme jäätiköt ovat alkaneet sulaa, etenkin vuoristojäätiköt, jotka sulavat nopeimmin. Tämä on aiheuttanut merenpinnassa eustaattista nousua (vesimäärän lisääntymisestä johtuvaa vesikerroksen paksuuntumista), joka 1900-luvulla on ollut keskimäärin 1,0 millimetriä vuodessa. Aivan vuosisadan lopulla eustaattinen nousu on nopeutunut ja lienee nykyisin on noin 1,5 millimetriä vuodessa. Ilmastopaneelin julkaisemien ennusteiden mukaan se tulee tästä edelleen nopeutumaan.

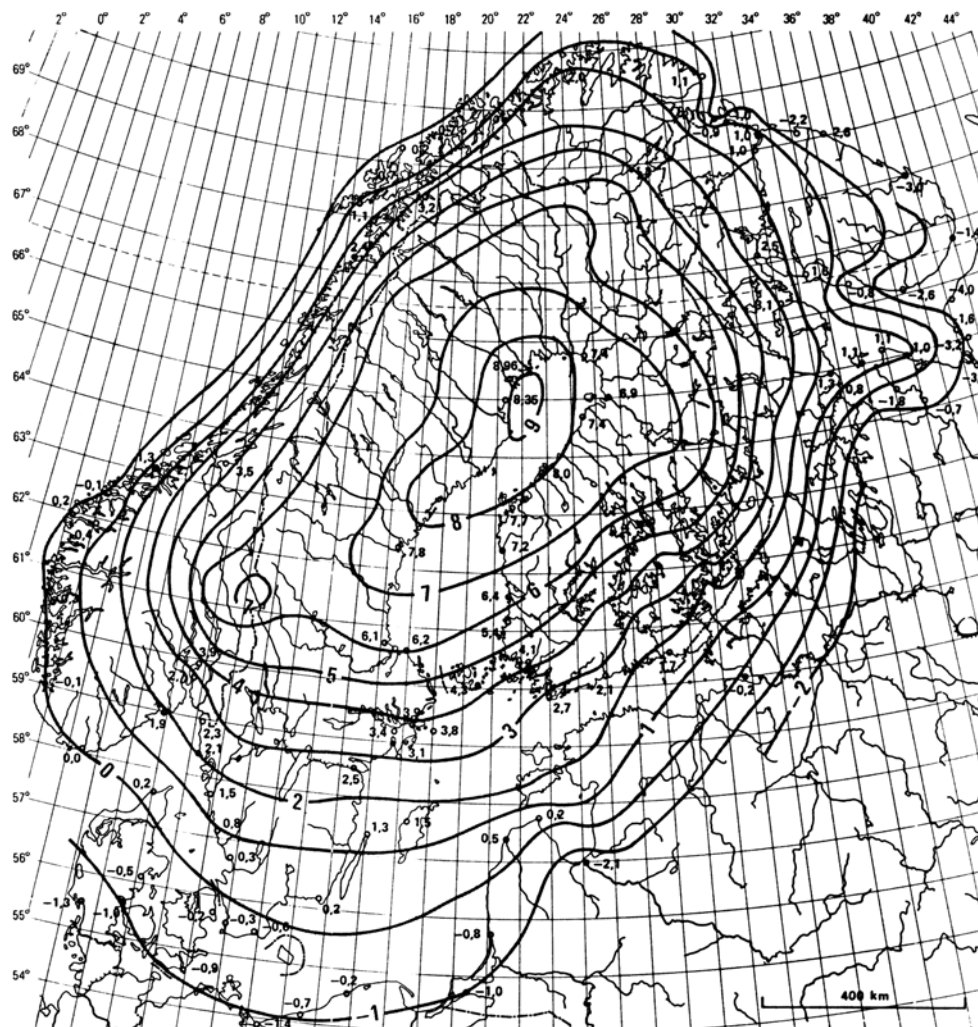
Jäätiköt eivät sula nopeasti eivätkä suoraviivaisesti. Etelämanner tarjoaa tästä parhaan esimerkin. Jos nimittäin ilmasto lämpenee, lämpenee myös Etelämannerta ympäröivän meriveden lämpötila. Tämä kiihdyttää haihduntaa kyseisellä merialueella ja lisää pilvisyyttä ja sateisuutta. Alueelle ominaiset tuulet siirtävät kosteata ilmaa mantereen yläpuolelle, ja koska siellä vallitsee kylmä ilmasto, kosteus sataa lumena alas. Jäätikön massa kasvaa sen vuoksi. Ilmaston lämpeneminen ei siis ainakaan aluksi aiheuta jäätikön vähenemistä vaan päinvastoin lisää sen massaa. Tilanne voi kuitenkin muuttua, jos lämpötila kohoaa riittävästi. Silloin kylmä mannerjää alkaa lohkeilla reunoiltaan, ja sen massatase kääntyy negatiiviseksi. Koko prosessi on kuitenkin monimutkainen ja kestää kauan, tuhansia, ehkä jopa kymmeniätuhansia vuosia.

Jäätiköiden muutosten aikamittakaavaa on syytä tarkastella erikseen. Massan kiertoaika ja niin sanottu dynaaminen vasteaika on erotettava toisistaan. Kiertoajalla tarkoitetaan jäätikön koko massan uudistumiseen kuluva aika. Se on kummallakin mannerjäätiköllä kymmeniätuhansia vuosia. Ilmastomuutosten kannalta dynaaminen vasteaika on tärkeämpi kuin kiertoaika. Sillä tarkoitetaan reaktioaikaa, jonka kuluessa jäätikön pääosan muutos, esimerkiksi sulaminen, on mahdollista. Jäätiköt reagoivat ilmaston muutoksiin hitaasti, pitkällä viiveellä, mikä johtuu prosessien monimutkaisuudesta ja hitaasta käynnistymisestä. Dynaamiset vasteajat ovat eri jäätiköillä eri pituiset: vuoristojäätiköillä 10–100 vuotta, Grönlannilla 1 000–10 000 vuotta, Etelämannereen länsiosalla 100–1 000 vuotta ja itäosalla 10 000–100 000 vuotta.

Edellä mainituista vain vuoristojäätiköt ovat selvästi sulamassa, tosin hitaahkosti, sillä lumirajan yläpuolelle kertyy satavasta lumesta jatkuvasti uutta jäätä sulavan tilalle. Etelämannereella sulaminen sen sijaan on vähäistä, ja reunan lohkeilu vastaa havaintotarkkuuden rajoissa jääkertymän suuruutta. Koska merkittävää sulamista ei tapahdu, pysyy suunnaton jäätikkö tasapainossa. Sen pienemmästä länsiosasta pessimistisimmät tutkijat ovat kuitenkin huolissaan. Toisin kuin massiivinen itäosa, länsiosa on toiminnallisesti epäyhtenäinen jäätikkö, useiden erikseen toimivien jääkenttien monimutkainen kokonaisuus. Sen keskiosat ovat kiinnittyneet merenpohjaan, ja monet sen jäätiköistä ovat lauttajäätiköitä, jotka kelluvat matalassa reunameressä. Lisäksi jäätikön pohja on paineolosuhteista johtuen paikoin lämmin, lähellä sulamispistettä. Tilannetta pahentaa toimiva vulkanismi monine tulivuorineen ja kuumine lähteineen. Nämä seikat saattavat tehdä länsiosan herkäksi ilmaston muutoksille, ja jonkin asteista sulamista lienee jo tapahtunutkin.

Entä sitten Grönlanti, mikä on sulamistilanne siellä? Yhdysvaltain avaruushallinnon NASA:n tekemien mittausten mukaan Grönlannin mannerjäätikkö on hitaasti sulamassa. Näissä mittauksissaan NASA:n tutkijat määrittivät lasertutkalla jäätikön yläpinnan korkeudet merenpinnasta kahteen kertaan, ensimmäisen kerran vuosina 1993–1994 ja toisen kerran 1998–1999. Saaren eteläosasta jäätikön keskeltä he löysivät kolme aluetta, joiden kohdalla jäätikkö oli ilmeisesti voimakkaan lumisateen johdosta paksuuntunut, ja vastaavasti rannikon läheisyydestä alueita, joiden kohdalla jäätikkö oli ohentunut. Itärannikolla, missä ohentuminen oli ollut nopeinta, lämpötilat olivat olleet normaalia korkeammat, länsirannikolla taas normaalia alhaisemmat. Paksuuntumisen ja ohentumisen erotus oli negatiivinen, ja jäätikön väheneminen sen vuoksi 45 kuutiokilometriä vuodessa. Merenpinta oli sen seurauksena noussut juuri ja juuri havaittavan määrän eli 0,13 millimetriä vuodessa. Sillä vauhdilla jäätikön sulaminen kestäisi vähintään 60 000 vuotta. Sulaminen voisi kuitenkin nopeutua, jos ilmasto jatkaisi lämpenemistään. Jäätikkömallit osoittavat näet, että jos lämpötilat kohoavat Grönlannin alueella

keskimäärin 3 °C nykyistä korkeammiksi ja pysyvät sitten niin korkeina muutaman tuhannen vuoden ajan, saarta peittävä jäätikkö sulaa kokonaan.



Kuva 1. Maankohoaminen Fennoskandiassa keskimerenpintaan nähden millimetreinä vuodessa.

3 Sulamisten vaikutukset merellä ja maalla

Maapallon kuorikerroksen osat, mantereet ja merenpohjat, ovat isostasiaopin mukaan tiheän vaipan päällä kelluvia lauttoja. Mantereet uppoavat *Arkhimedeksen* lain mukaisesti sitä syvemmälle vaippaan, mitä paksumpaa jääkuormaa ne kantavat, ja vastaavasti palaavat alkuperäiseen korkeuteensa, tosin hitaasti, kun jääkuorma poistuu. Merenpohjat reagoivat samalla tavalla vesimäärän muutoksiin. Nyrkkisäännön mukaan 100 metriä paksu jääkerros painaa maankuorta lommolle 27 metriä ja 100 metriä paksun vesikerroksen poisto valtameristä kohottaa merenpohjaa 30 metriä.

Jos ja kun suuri mannerjäätikkö sulaa, aiheutuu siitä joukko koko maapalloa koskevia muutoksia, ensinnäkin paikallista postglasiaalista maankohoamista mannerjäätikön peittämällä alueella (kuten nykyisin Fennoskandiassa ja Kanadassa), toiseksi maankuoren laaja-alaisia muutoksia, nimittäin merenpohjan vajoamista kaikilla merialueilla ja sen seurauksena mannerten kohoamista kaikilla mantereilla, ja kolmanneksi globaalin painovoimakentän muutos.

Valtameret peittävät maapallomme pinta-alasta noin 70 %. Niin laajalla alueella tapahtuva merenpohjan vajoamisliike synnyttää mannerten alle nostopainetta, joka kohottaa niitä, aivan

kirjaimellisesti vipuaa niitä ylöspäin, jotta merellinen ja mantereellinen kuori voisivat säilyttää keskinäisen tasapainonsa. Tätä ilmiötä, jota erityisesti pohjois-amerikkalaiset geofyysikot ovat tutkineet, sanotaan mannerten vipuamiseksi (levering of the continents).

Vanhimmat mannerten kohoamista käsittelevät tutkimukset ovat peräisin 1900-luvun alkupuolelta. Niistä mainittakoon amerikkalaisen *R. A. Dalyn* jo unohtettu tutkimus vuodelta 1925, jonka mukaan eustaattinen merenpinnan nousu deformoi maankuorta mittasuhteiltaan merkittäväällä tavalla. Myös *R. I. Walcott* ja *W. R. Peltier* ovat päätyneet tähän tulokseen, samoin Purduen yliopiston suomalaissyntyinen geodesian professori *Lassi Kivioja*. Jos esimerkiksi Etelämantereelta siirrettäisiin 65 metrin paksuista vesikerrosta vastaava jäämäärä valtameriin, syvenisivät meret Kiviojan mukaan keskimäärin 15 metriä, mutta koska mantereet kohoaisivat samanaikaisesti 35–40 metriä, jäisi suhteelliseksi maanousuksi rannikoilla loppujen lopuksi vain 10–15 metriä. Walcottin mukaan nousu olisi mannerten keskiosissa 30 % ja vaihtumisvyöhykkeellä rannikon läheisyydessä keskimäärin 15 % eustaattisesta merenpinnan noususta.

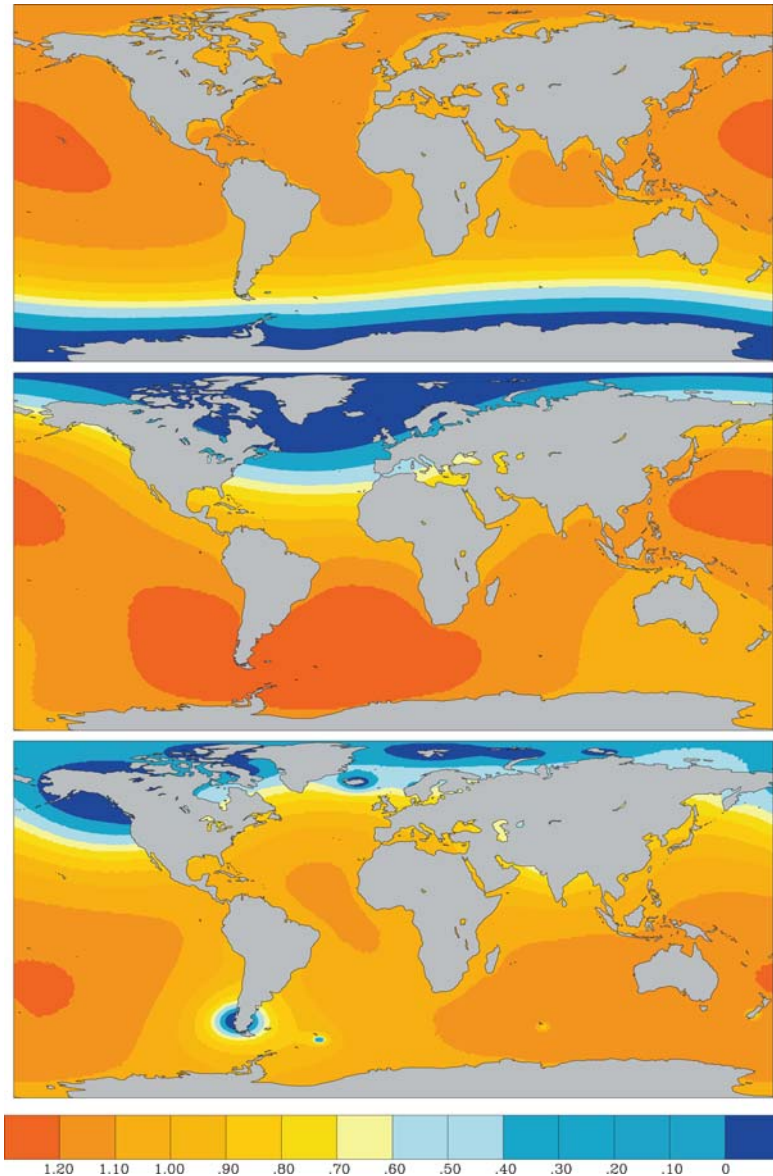
4 Painovoiman muutoksen vaikutukset merenpinnassa

Painovoima vaikuttaa eustaattisen nousun jakautumiseen merialueiden kesken ehkä hieman yllättävällä tavalla. Kuten tunnettua, kaikki massat vetävät toisiaan puoleensa tavalla, jonka Newtonin vetovoimalaki ilmaisee, siis myös mannerten pinnalle kertyneet jäätiköt, jotka kiskovat merivettä puoleensa. Kun jäätikkö sulaa ja siitä vapautuvat vesimassat siirtyvät meriin, kokee maapallo kimmoisan muodonmuutoksen. Samalla häviää merivettä puoleensa vetävä voima, ja merenpinta laskee sen ja kimmoisan muodonmuutoksen vuoksi jäätikön välittömässä läheisyydessä. Kauempana merenpinta sen sijaan nousee globaalia keskiarvoaan nopeammin. Toronton yliopiston geofysiikan laitoksella laaditut kartat osoittavat, mitä itse asiassa tapahtuu. Kartoista ylin osoittaa Etelämantereen, keskimäinen Grönlannin ja alin muiden jäätiköiden aiheuttaman eustaattisen nousun maapallomme eri osissa. Väriasteikon luvut ovat kertoimia, joilla keskimääräinen nousu on kerrottava, jotta saataisiin nousu väriä vastaavassa meren osassa. Tarkastelkaamme niitä lähemmin.

1. Ylin kartta kuvaa Etelämantereen sulamista. Sen mukaan merenpinta alenee jäätikön välittömässä läheisyydessä muutaman sadan kilometrin levyisellä vyöhykkeellä, mutta nousee muualla, eniten Tyynen valtameren keskiosissa, samoin Atlantin valtameren pohjoisosassa.

2. Keskimäinen kartta puolestaan on Pohjois-Euroopan kannalta mielenkiintoisin. Tutkimukset osoittavat näet, että jos lämpötilat pysyvät Grönlannin alueella korkeina muutaman tuhannen vuoden ajan, jäätikkö sulaa kokonaan. Sulamisajaksi voidaan perustellusti ottaa 3 000–4 000 vuotta, mikä vastaa keskimäärin 2 millimetrin vuotuista vedenpinnan nousua maapallomme merissä. Kartasta voidaan todeta, että merenpinta alenee jäätikön sulamisen takia 0,1–0,2 millimetriä vuodessa, paitsi Grönlannin rannikolla, myös Jäämerellä ja Pohjois-Atlantilla. Itämerellä se nousee hitaasti, 0,2–0,4 millimetriä vuodessa, siis 2–4 senttimetriä sadassa vuodessa. Etäällä sulavasta jäätiköstä, Atlantin valtamerellä, Intian valtamerellä ja Tyynellä valtamerellä, merenpinta sen sijaan nousee globaalista keskiarvoaan nopeammin, 2,4–2,6 millimetriä vuodessa. Grönlannin sulamisvedet kertyvät siis pääasiassa Eteläisen pallonpuoliskon merialueille. Ne eivät aiheuta tulvavaaraa maamme rannikoilla, sillä senkin vähän, minkä merenpinta meillä Grönlannin sulamisen johdosta nousee, maannousu kompensoi moninkertaisesti.

3. Alin kartta kuvaa muiden jäätiköiden sulamista. Kun niiden sulamisnopeudeksi oletetaan 1,0–1,5 millimetriä vuodessa, mikä vastanee hyvin todellisuutta, saadaan merenpinnan nousuksi Itämeren alueella 0,8–1,2 millimetriä vuodessa. Myös tämä vastaa hyvin todellisuutta ja osoittaa, että merenpinnan nykyinen eustaattinen nousu maamme rannikoilla johtuu pääasiassa vuoristojäätiköiden sulamisesta.



Kuva 2. Toronton yliopistossa laadittu kartta merenpinnan eustaattisen nousun jakautumisesta eri sulamistilanteissa. Ylin kartta osoittaa Etelämantereen, keskimääräinen Grönlannin ja alin vuoristo-jäätiköiden sulamisesta aiheutuvan eustaattisen nousun valtamerien eri osissa. Väriasteikon luvut ovat kertoimia, joilla keskimääräinen merenpinnan nousu on kerrottava, jotta saataisiin nousu värin osoittamalla merialueella. Lähde: Mitrovica et al., *Nature* 409:1026-1029 (2001). Copyright © Macmillan Publishers Ltd.

Kakkuri, Juhani (2003). *Tulevaisuuden uhkakuvat*. WSOY.

Kivioja, L. (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. Tamarcia, J. L. Davis and G. A. Milne (2001). *Recent mass balance of polar ice sheets inferred from pattern of global sea level change*. *Nature*, vol. 401, 1026-1029.

Peltier, W. R. (1999). *Global sea level rise and glacial isostatic adjustment*. *Global and Planetary Change* 20 (1999), 93-122.

Wallcott, R. I. (1972). *Past Sea Levels, Eustasy and Deformation*. *Quaternary Research* 2, 1-14.