

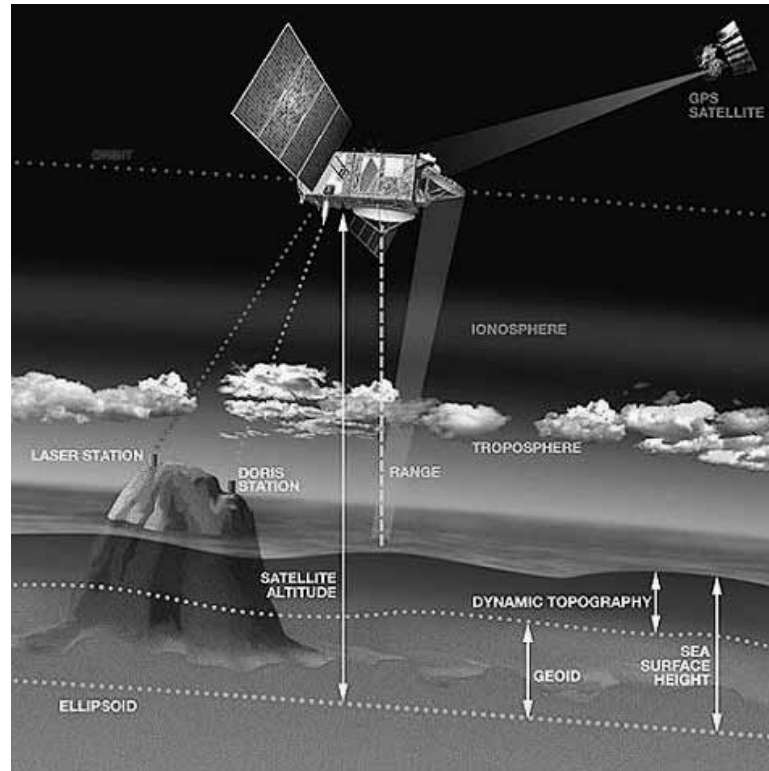
Satelliitti mittaa merten pinnankorkeutta tarkasti

■ Jouko Launiainen

Valtamerten pinnannousu on 17 viime vuoden aikana säilynyt vakaana. Merenpinnan vaihteluiden suuret alueelliset erot ovat yllättäneet tutkijat.

Merenpinnan korkeutta on rannikoilla havainnointu pitkään. Niinpä esimerkiksi paikallinen vuorovesi on tunnettu ja kyetty ennustamaan jo vuosisatojen ajan. Tarkkoja merenpinnan korkeuden mittauksia tehdään nykyisin parilla tuhannella rannikoiden havaintoasemalla, mareografeilla, eri puolin maailmaa. Merten ulappa-alueiden pinnankorkeutta on sen sijaan kyetty mittaamaan tarkasti vasta parinkymmenen vuoden ajan. Jatkuvat mittaukset alkoivat vuonna 1992 Yhdysvaltojen avaruusjärjestö NASAn Topex/Poseidon-satelliitilla ja niitä jatkettiin vuonna 2001 NASAn ja Ranskan avaruusjärjestön CNES:n yhteisellä Jason-1-satelliitilla. Viimeisin satelliitti, Jason-2, laukaistiin kesäkuussa 2008. Myös Suomi osallistuu Ilmatieteen laitoksen ja Euroopan sääsatelliittijärjestön EUMETSATin kautta nykyiseen Jason-ohjelmaan. Tällä haavaa valtamerten pintaa mitataan myös muutamilla muilla satelliiteilla (ERS-2- ja GFD-satelliitit).

Satelliitit kiertävät maata 1 300 kilometrin korkeudessa sekä mittaavat mikroaaltotutkalla ns. ”merenpinnan topografiaa” (kuva 1). Merenpinnan korkeuden lisäksi satelliittien mittalaitteiden tuloksista saadaan laskettua mm. tuulen aiheuttama aallokko ja käänteismenetelmillä itse tuuletkin. Aallokon, vuoroveden, ilmanpaineen sekä muiden lyhytaikaisten tekijöiden vaikutus poistetaan laskentavaiheessa ja satelliittimittaukset sidotaan kontrollihavaintoihin. Valtamerten pinnankorkeus määrittyy hyvin tarkasti kymmenen päivän välein ja merenpinnan kuukausi- ja vuosikeskiarvot saadaan määritettyä hämmästyttävällä muutaman millimetrin tarkkuudella. Napamerillä meri-

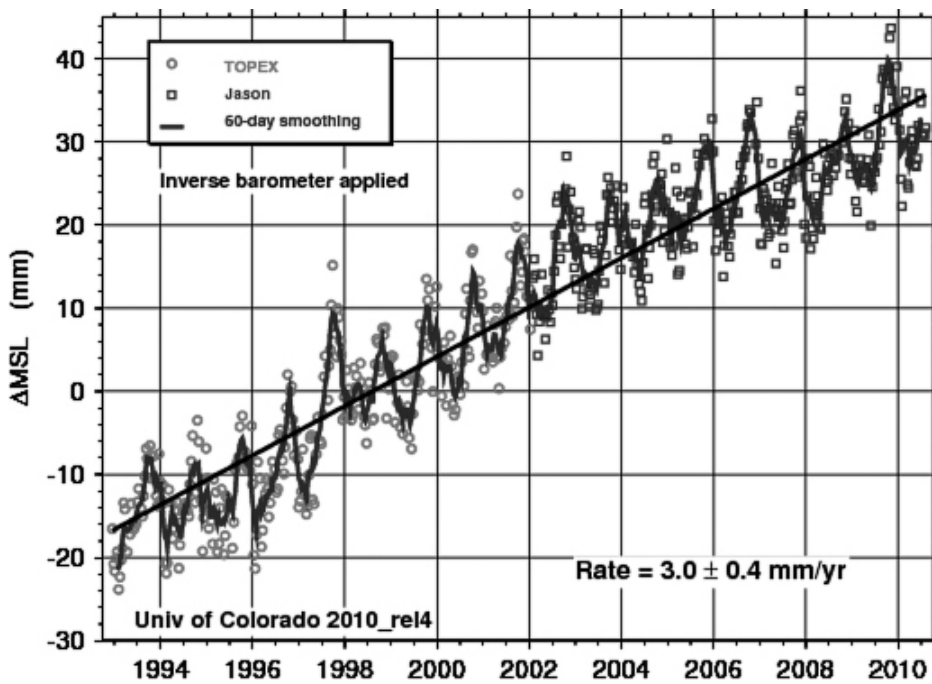


Kuva 1. Satelliitti mittaa merten pinnankorkeutta 13,6 GHz:n mikroaaltotutkalla. Mittauksen tarkka paikka määritetään GPS- ja Doris-paikoitusmenetelmillä. Satelliitin oma korkeus määritetään maapallon geoidin (gravitaatiokentän) suhteen. Keskimääräisen merenpinnan ja tuulten sekä ilmanpaineen vaikutusten lisäksi alueelliseen pinnankorkeuteen vaikuttaa ns. meren dynaaminen topografia. Dynaamisen topografian ja siihen liittyvän merenpinnan kaltevuuden aikaansaavat merivirtaukset sekä virtauksiin vaikuttava maapallon pyörimisliike (coriolis-kiiktyvyys). Satelliitti mittaa hetkellisen pinnankorkeuden noin 3 cm:n tarkkuudella ja koko maapallon valtamerten pinnankorkeus voidaan määrittää kymmenen päivän välein noin 0,5 cm:n tarkkuudella. (Lähde: Centre National d'Etudes Spatiales, CNES, Ranska.)

jää häiritsee tarkkaa merenpinnan korkeuden mittausta, mutta satelliittien mikroaaltotutkilla voidaan puolestaan mitata mm. merijään paksuutta.

Valtamerten pinta nousut tasaisesti

Satelliittimittaukset osoittavat valtamerten ns. *World Ocean* -merenpinnan nousseen viime vuosina melko tasaisesti, keskimäärin 3,2 mm



Kuva 2. Satelliittien mittaama maapallon valtameren (World Ocean) pinnankorkeus marraskuusta 1992 elokuuhun 2010. Ympyrät ja neliöt kuvaavat 10 päivän välein havaittua pinnankorkeutta ja jatkuva käyrä 60 päivän tasoitettua vaihtelua. Keskimääräisen nousun lisäksi tuloksista ilmenee vuotuinen vaihtelu. Merten pinnannousun tarkan arvon määrittämiseksi on satelliittituloksiin lisättävä maapallon geoidin GIA-korjaus (Glacial Isostatic Adjustment). Valtameren viimeaikainen kokonaisnousu on siten ollut 3,2 mm/v. (Lähde: <http://sealevel.colorado.edu/>, University of Colorado, Yhdysvallat.)

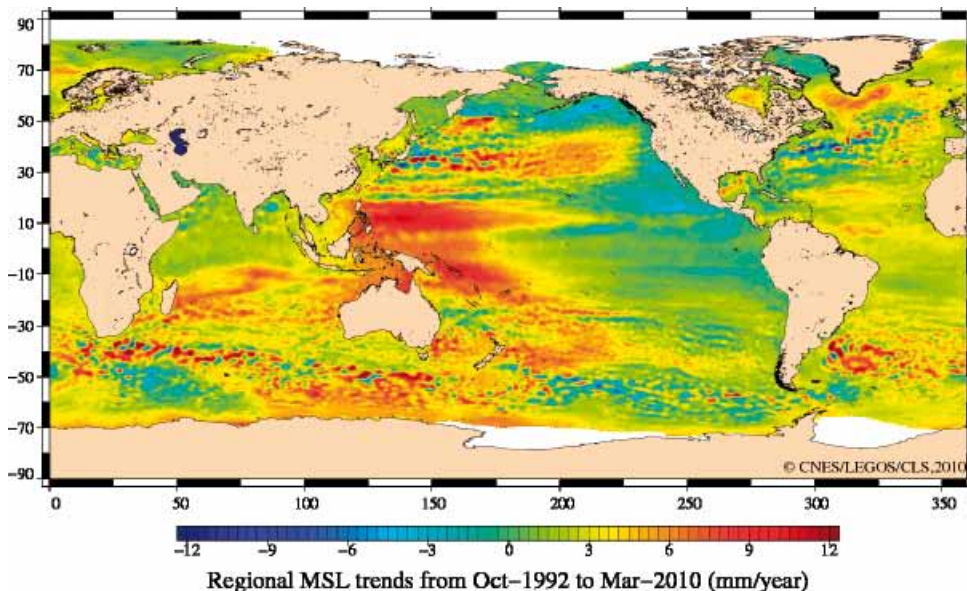
vuodessa (kuva 2). Vuoden 1997 suuri nousu liittyy Tyynen valtameren voimakkaaseen El Niño -ilmiöön ja meren lämpenemiseen vuosina 1997–98. Vuosina 2005–08 oli nousu puolestaan aiempaa hitaampaa. Myös Atlantilla on keskimääräinen pinnannousu ollut noin 3 mm/v, mutta vuodenaikaisvaihtelu on voimakkaampaa, noin 2,5 cm, sekä myös vuosien 2005–08 pinnannousun hidastuminen oli selkeämpi.

Satelliittien mittaama pinnannousu on suurempi kuin rannikkohavainnoista määritetty 1900-luvun keskimääräinen 1,8 mm:n vuotuinen pinnannousu ja vastaa suuruusluokaltaan kansainvälisen ilmastopaneelin (IPCC AR4, 2007) lähivuosikymmenien skenaariota (> 3 cm/10 v). On toisaalta teoreettisesti epäselvää, voidaanko rannikoiden havaintoja suoraan tarkasti verrata syvän valtameren havaintoihin.

Alueelliset vaihtelut suuria

Ilmastonmuutoskeskustelujen myötä on merten pinnannoususta puhuttaessa tullut yleisesti mieleen tasaisesti linssimäisenä tai pallokuorena nouseva merenpinta. Näin ei suinkaan ole, ei teoreettisesti eikä käytännössä. Merenpinnan korkeuteen vaikuttavat meriveden lämpötila ja suolaisuus sekä merivirrat, ilmanpaineen vaihtelut ja tuulet. Viimeksi mainittujen vaikutus ilmenee keskiarvoissa lähinnä vain ”pysyväisten” tuulivyöhykkeiden alueilla. Veden lämpötila ja lämpötilan jakautuminen vesipatsaassa on lämpölaajenemisen kautta yleensä tärkein keskimääräisen pinnankorkeuden vaihteluita säätelevä tekijä. Lisäksi pinnanousuun vaikuttaa vesimäärän lisäyksenä jäätiköiden sulaminen sekä myös ilmakehän, mantereiden ja merten keskinäinen ”vesitaso”.

Karttakuvassa (kuva 3) on esitetty seitsemäntoista viime vuoden aikana tapahtunut valtameren vedenpinnan keskimääräinen muutos. Tutkijoitakin on hämmästyttänyt muutostrendien alueellinen vaihtelu ja mutkikkuus. Niinpä keskimääräisen 3,2 millimetrin vuotuisen pinnannousun ohella valtamerissä on alueita, joissa nousu on ollut nopeampaa, jopa sentin vuodessa, mutta toisaalta alueita, joissa merenpinta on laskenut. Osalle alueellisista eroista ei vielä tunneta syitä ja mekanismeja. Tyynellä valtamerellä on leimallisena itä–länsi-suuntainen vastakkaisuus. Keskeisenä tähän pidetään ns. PDO:n eli Tyynen valtameren vuosikymmenten välisen oskillaation (*Pacific Decadal Oscillation*) kylmää vaihetta. Vuosien 1997–98 voimakasta El Niñoa lukuun ottamatta itäinen Tyyni valtameri on pysynyt viileänä ja laskenut vedenpin-



Kuva 3. Valtamerten pinnan korkeuden keskimääräinen alueellinen muutostrendi (mm/v) vuosien 1992–2010 aikana. (Lähde: CNES, Ranska. Kuva värlisenä <http://www.avisioceanobs.com/en/news/ocean-indicators/mean-sea-level/> sekä Tieteessä tapahtuu 8/2010 verkkoversiossa).

taa Pohjois- ja Etelä-Amerikan rannikolla sekä vastaavasti nostanut pintaa Tyynenmeren länsiosissa. PDO on Tyynessä valtameressä 50–60 vuoden jaksoin ilmenevä meren lämpötilavaihtelu (Parker ym., 2007). Tämä vaihtelu, maksimissaan pari astetta, on vähäisempi kuin yleisemmin tunnettuun El Niño -ilmiöön liittyvä vaihtelu. PDO on paljon laaja-alaisempi kuin ekvaattoriseudun El Niño, ja sillä näyttää olevan laajat ilmastovaikutukset, mutta ilmiön syyt ja mekanismeja ei vielä tunneta eikä pystytä mallintamaan.

Pohjois-Atlantilla on 50–60° N -leveyspiirillä Grönlannin eteläpuolella itä-länsi-suuntainen alue, jossa merenpinta on noussut. Läntisellä Atlantilla 35–40° N -leveyspiirillä on puolestaan runsaan 2000 km:n pituinen alue, jossa merenpinta on laskenut. Nämä trendit liittyvät meren lämpötilavaihteluihin, joista ensin mainittu näkyy sääsatelliittien kuvissa meren lämpötilan nousuna sekä jälkimmäinen läntisen Pohjois-Atlantin ja Amerikan rannikon viileänä lämpötila-anomaliana. Atlantin merivirtojen dynamiikan valossa ei kyseessä oleva lämpötila-anomalioiden syy kuitenkaan ole kunnolla tunnettu, eikä tiedetä olisiko pitkäaikaisella ns. AMOlla eli *Atlantic Multi-Decadal oscillation* (AMO; Kerr, 2000) näihin keskeinen osuus. Sekä Tyynenmeren PDO että Atlantin AMO ovat ilmeisimmin alkuperältään globaalia luonnonmukaista vaihtelua, ja vielä ei tiedetä niiden

vaikutusta ihmisen aiheuttamaan ilmastomuutokseen, tai toisinpäin.

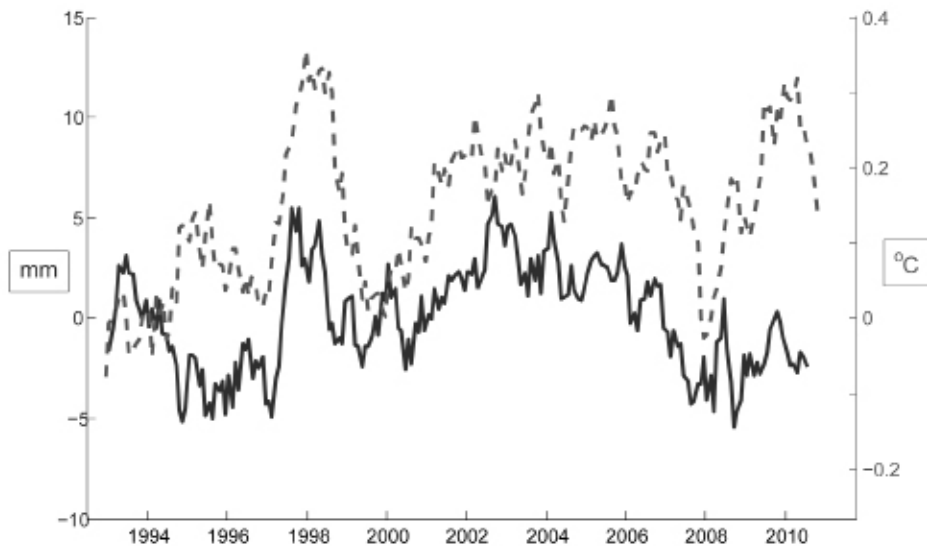
Intian valtamerellä on merenpinnan nousu ollut hitaampaa, alle globaalin keskiarvon. Viime aikoina keskusteluissa esillä olleen Malediivien seutuvilla nousu on ollut 2 mm/v. Toki on tähdennettävä että satelliittien mittaamat meren pinnakorkeuden trendit kattavat vielä melko lyhyen jakson.

Merens lämpötila ja suolaisuus tärkeät

Merenspinnannousun alueellista vaihtelua valaisee myös laskennallinen esimerkki. Oletamme, että valtameren ylin 1 000 metrin aktiivinen kerros lämpenee 1 asteen sekä tämän alapuolinen kerros, aina valtameren keskisyvyyteen 3 700 m:iin asti, lämpenisi 0,2 astetta. Lämpötilannousua vastaava merenspinnannousu voidaan laskea meriveden ominaistilavuuden (tiheyden) tarkalla tilanyhtälöllä, joka määrittää lämpötilan, veden suolaisuuden ja paineen (syvyyden) vaikutuksen (UNESCO, 1981; Wright, 1997). Esimerkin lämpenemistä vastaava merenspinnannousu on näin laskettuna

päiväntasaajaseudulla	32 cm
Pohjois-Atlantilla	14 cm
valtamerissä keskimäärin	24 cm

Toisin sanoen samansuuruisista lämpötilannousua vastaa lämpimillä päiväntasaajan seu-



Kuva 4. Katkoviivan osoittama ylempi käyrä kuvaa valtamerien globaalia pintalämpötilaa (kuukausi-anomaliat 12/1992–10/2010, jaksoon 1971–2000 verrattuna). Alempi kuvaaja on poikkeama (mm) kuvan 2 mukaisesta valtamerien pinnankorkeuden lineaarisesta trendistä (vrt. teksti). (Lämpötilahavainnot: OIv2/NCDC; National Climate Data Center, Yhdysvallat. Vedenkorkeushavainnot: Univ. of Colorado, Yhdysvallat.) Analyysi kirjoittajan.

duilla kaksinkertainen pinnannousu kylmiin napa-alueisiin verrattuna. Esimerkit vastaavat tyypillisiä päiväntasaajaseudun, napamerien sekä keskimääräisen ”World Ocean”-meriveden suolaisuuden ja lämpötilan arvoja ja syvyysjakautumia. Pohjois-Atlantin vähäisempi pinnannousu aiheutuu siitä, että meri on pinnasta pohjaan kylmä, noin $+3$ ja -1°C :n välillä. Tilanne olisi vastaava myös eteläisen pallonpuoliskon napamerillä. Käytännössä esimerkin pinnannousut vastaisivat lämpenemisen noin 50 vuoden ilmastoskenaarioita. Maapallon kylmistä meristä löytyy joitakin alueita, joilla lämpötilan ja suolaisuuden jakautuminen on sellainen, että lämpötilan pieni nousu alkuun jopa hivenen lasiksi merenpintaa.

Pintalämpötila vertaa tarkasti

Kuten pinnankorkeutta, havaitaan merten pintalämpötilaa hyvin tarkasti satelliitein, laivoilta sekä ajelehtivilla poijuilla ja autonomisesti liikkuvilla laitteilla. Pinnankorkeuden vertailu merten pintalämpötilan vaihteluun osoittaa kiinnostavan ja yllättävän samankaltaisuuden. Kun kuvan 2 pinnankorkeuden havainnoista poistetaan keskimääräinen vuodenaikainen vaihtelu sekä lasketaan poikkeama lineaarisesta noususta osoittaa jäljelle jäävä residuaalivaihtelu samantapaista kulkua kuin valtamerien pintalämpötilan anomalia viime vuosikymmenten aikana (kuva 4). Niinpä vuosina 2003–08, jolloin merten läm-

pötila ei kasvanut vaan pikemminkin laski, nousi valtamerien pinta vuosien 1992–2010 keskiarvoa hitaammin. Pintalämpötilan $0,1$ asteen vaihtelua vastaa noin 3 mm:n merten pinnan vaihtelu. Merten lämpenemiseen vuodesta 2008 alkuvuoteen 2010 liittyen pinnannousu nopeutui, mutta on lämpenemisen vaimennuttua tällä haavaa hidastunut. Vuodesta 2003 alkaen on keskimääräinen pinnannousu ollut alle 2 mm vuodessa. Koska merten lämpötilan ja pinnankorkeuden havaintojärjestelmät ovat toisistaan riippumattomat, osoittaa vertailu toisaalta myös nykyisten havaintojen hämmästyttävän herkkyyden ja luotettavuuden.

Pintalämpötila ”peilaa” hyvin merten pinnanvaihtelua, mutta fyysikaalisesti meren pintalämpötila on vain yksi tärkeimmistä pinnankorkeuteen vaikuttavista tekijöistä. Onkin ilmeistä että pelkän pintalämpötilan vedenkorkeutta hyvin kuvastava vaikutus pohjautuu siihen, että valtamerien pintalämpötila ilmentää globaalien lämpöolosuhteiden lisäksi ainakin epäsuorasti myös hydrologista balanssia, jäätikköjen sulamista yms.

Yhteenveto ja näkymät

Merten pinnannousu on säilynyt viime aikoina vakaana toisin kuin ilmastomuutoskeskustelujen myötä ehkä saatu erheellinen mielikuva, jonka mukaan merten pinnannousu olisi kaiken aikaa kiihtymässä. Keskimääräinen nousu

on ollut 3,2 cm kymmenessä vuodessa, mutta alueelliset erot ovat huomattavia. Merenpinnan nousun seuraaminen ja ennustaminen on ilmastonmuutoksen voimistuessa tärkeää. Lämpenemisen aiheuttaman pinnannousun suuruusluokasta antaa käsityksen edellä oleva laskennallinen esimerkki. Merten lämpenemisen ennusteet eivät vielä anna mahdollisuuksia tarkkoihin arvioihin.

Lämpenemisen ohella jäätiköiden ja erityisesti mannerjäätiköiden sulaminen on tärkein riski voimistuvalla merenpinnanousulle. GRACE-ohjelman satelliittimittausten avulla on Grönlannin mannerjäätikön laskettu vuosina 2003–08 sulaneen noin 250 gigatonnia vuodessa (van den Broeke ym., 2009). Tämä vastaa noin 0,7 mm:n osuutta vuosittaisessa valtameren pinnannousussa, mutta vaikutusta on mittauksista vaikea identifioida. Lisäksi Atlantin vedenkorkeuden nousu on mainittuna aikana lähinnä hidastunut. Grönlannin mannerjäätikön kelluvasta Petermannin jäätiköstä irtosi elokuun 2010 alussa 270 km²:n laajuinen lautta, mutta pääosin kelluvana lauttana sillä ei ole vaikutusta merenpintaan. Laajuudesta huolimatta ei tuon kokoista lauttarepeämää vastaavalla vesimäärällä olisi tilavuuden lisäyksenäkään havaittavaa vaikutusta merten pintaan (vastaten 0,1–0,2 mm). Vertailuesimerkkinä jäätiköiden tähänastisille vaikutuksille voidaan todeta että 10 %:n muutos maapallon suurimman joen Amazonasin virtaamassa (220 000 m³/s) aiheuttaisi valtameren pinnassa vuodessa 1,9 mm:n muutoksen.

Grönlannin mannerjäätikön sulaminen vastaisi merten 6–7 m:n pinnannousua. Länsi-Antarktiksien mannerjäätikkö vastaa 5 m:n ja Itä-Antarktiksien laaja ja paksu jäätikkö 55 m:n nousua. Tarkastelu yksinkertaisella termody-

naamisella mallilla osoittaa, että Grönlannin ja Länsi-Antarktiksien jäätikön häviäminen sulamalla termisesti vaatisi, vaikka ilmasto lämpenisi nykyisestä merkittävästi, vähintään satoja tai pikemmin ainakin tuhat vuotta. Skenaarioita jäätiköiden repeämistä ja meriin valumisista on esitetty, mutta geofysikaalisesti hyvin ”suojassa” olevan Itä-Antarktiksien jään sulamiseksi tai häviämiseksi ei ole kuviteltavissa mekanismeja. Näillä näkymin ei pahimmista skenaarioista huolimatta ole perustellusti nähtävissä suurimittaista mannerjäätiköiden hupenemista, vaan mm. kansainvälisen ilmastopaneelin (IPCC AR 4, 2007) arvio suuruusluokaltaan 0,2–0,7 m:n merenpinnan keskimääräisestä noususta vuosisadan loppuun mennessä on perusteltu. Geofysikaaliset oseanografiset tekijät lisäksi aikaansaavat sen, että pinnankorkeuden trendeillä on alueellista vaihtelua.

Viitteet

- AMO: http://www.aoml.noaa.gov/phod/amo_faq.php
<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/amon.us.long.data>
- van den Broeke et al. (2009), Partitioning Recent Greenland Mass Loss, *Science*, 326, (5955), pp. 984–986, DOI: 10.1126/science.1178176
- Kerr, R. A. (2000), A North Atlantic climate pacemaker for the centuries, *Science*, 288 (5473), pp. 1984–1986.
- Parker, D., C. Folland, A. Scaife, J. Knight, A. Colman, P. Baines, and B. Dong (2007), Decadal to multi-decadal variability and the climate change background, *J. Geophys. Res.*, 112, D18115, doi:10.1029/2007JD008411.
- PDO: <http://jisao.washington.edu/pdo/>
- UNESCO (1981), Background papers and supporting data on the International Equation of State of Seawater 1980, *UNESCO Technical papers in marine science* No. 38.
- Wright, D. G. (1997), An equation of state for use in ocean models: Eckart's formula revisited, *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*, 14, 735D 740, 1997.

Kirjoittaja on professori ja vuonna 2008 lopetetun Merentutkimuslaitoksen entinen osastonjohtaja.