

HALLITUSTENVÄLINEN ILMASTONMUUTOSPANEELI (IPCC)

ILMASTONMUUTOS V. 2013:

LUONNONTIETEELLINEN PERUSTA

YHTEENVETO PÄÄTÖKSENTEKIJÖILLE SUOMEKSI

Ensimmäisen työryhmän osuus IPCC:n 5. arviointiraportissa

Suomenkielisen tekstin on laatinut Ilmatieteen laitoksen tutkija Kimmo Ruosteenoja. Englanninkielinen yhteenveto "Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution of to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers" on saatavissa IPCC:n verkkosivustolta (<http://www.ipcc.ch>). Tällä verkkosivustolta löytyy myös raportti kokonaisuudessaan.

ESIPUHE

IPCC-raportin päätöksentekijöille kirjoitettua yhteenvetoa suomennettaessa tavoitteena on ollut yhtäältä saada alkuperäisen tekstin sanoma välittymään mahdollisimman muuttumattomana ja toisaalta tuottaa ymmärrettävää ja lukukelpoista suomenkielistä tekstiä. Käännettäessä kukin tekstikappale tai palluralla merkitty kohta on käsitelty omana kokonaisuutenaan ja kyseisen kohdan sisältämä viesti on pyritty siirtämään vastaavaan suomennoksen kohtaan. Sen sijaan englanninkielisiä lauserakenteita ei ole yritetty seurata, koska se estäisi järkevien suomenkielisten lauseitten synnyn. Alkuperäisen tekstin pitkiä lauseita on tarvittaessa pilkottu ja asioitten esitysjärjestystä yksittäisen kohdan sisällä on saatettu muuttaa. Tieteellisiä erityiskäsitteitä on pyritty käyttämään säästeliäästi, ja sen sijaan on suosittu yleiskielisiä ilmaisuja. Kansantajuisuuden nimissä joitakin vähemmän keskeisiä vaikeatajuisia tieteellisiä yksityiskohtia on sivuutettu ja myös pienipiirteistä vertailua IPCC:n aikaisempiin raportteihin on jätetty pois. Toisaalta maallikolle muutoin hämäräksi jääviä asioita on paikoin selitetty hieman alkuperäistä esitystä laveammin.

Tämä suomenkielinen teksti on luonteeltaan epävirallinen. Erityisesti kaikissa sellaisissa käyttötarkoituksissa, joihin voi liittyä oikeudellisia seuraamuksia, asiat on syytä aina tarkistaa alkuperäisestä tekstistä. Suomenkielinen teksti on tarkoitettu nimenomaan sellaisille ihmisille, joita kiinnostaa raportin **asiasisältö**: tiedotusvälineitten edustajille, poliitikoille, virkamiehille, talouselämän palveluksessa oleville, opettajille ja opiskelijoille, yksittäisille kansalaisille, jne.

Suomenkielisen version kehittämiseen ja tarkistamiseen ovat osallistuneet monet henkilöt, joista suurimman panoksen ovat antaneet Heikki Tuomenvirta, Sanna Luhtala, Mikko Alestalo, Jouni Räisänen ja Timo Vihma.

6.3.2014

Kimmo Ruosteenoja

(Pari virhettä korjattu ja lisätty yleisön toivomuksesta sisällysluettelo 4.4.2014)

As a UN body the IPCC publishes reports only in the six official UN languages. This translation of the “Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers” is therefore not an official translation by the IPCC. It has been provided by the Finnish Meteorological Institute.

Sisältö

A. Johdanto	3
B. Ilmaston tähänastiset muutokset havaintojen perusteella	3
B.1 Ilmakehä	4
B.2 Meret	8
B.3 Jää ja lumi	9
B.4 Merenpinnan korkeus	11
B.5 Hiilen kiertokulku ja kasvihuonekaasujen lisääntyminen	11
C. Ilmastoa muuttavat pakotteet	13
D. Ilmaston viimeaikaisten muutosten selittyminen	16
D.1 Ilmastomallit kehittyvät	17
D.2 Palauteilmiöt ja ilmaston herkkyys	18
D.3 Mistä jo koettu ilmastonmuutos johtuu?	19
E. Ilmaston maailmanlaajuiset ja alueelliset muutokset tulevaisuudessa	22
E.1 Ilmakehän lämpötilat tulevaisuudessa	23
E.2 Veden kiertokulun ennustetut muutokset	23
E.3 Ilman laadun muutokset	27
E.4 Tulevat muutokset merissä	27
E.5 Jää- ja lumipeite tulevaisuudessa	28
E.6 Merenpinnan korkeuden ennustetut muutokset	29
E.7 Hiilen kiertokulun muutokset	30
E.8 Ilmastonmuutoksen pysäyttäminen ja kasvihuonekaasujen päästöistä aiheutuvat pitkäkestoiset muutokset	32
Tietolaatikko SPM.1: RCP-kasvihuonekaasuskenaariot	35

A. Johdanto

IPCC:n 5. arviointiraporttia laadittaessa ensimmäisen työryhmän tehtäväksi oli annettu ilmastomuutosta koskevan uuden tieteellisen näytön arvioiminen. Tätä varten piti tarkastella mm. ilmastojärjestelmästä tehtyjä havaintoja, maapallolla aikaisempina aikoina esiintyneitä ilmastovaihteluja, ilmastoon vaikuttavia ilmiöitä käsitteleviä teoreettisia tutkimuksia sekä ilmastomalleilla laskettuja simulointeja. Työ pohjautui edelliseen arviointiraporttiin sekä sen julkaisemisen jälkeen ilmestyneisiin uusiin tutkimustuloksiin.

Tässä päätöksentekijöille tarkoitetussa yhteenvedossa kunkin asiakokonaisuuden alussa on esitetty punaisiin laatikkoteksteihin kyseisen kohdan oleelliset johtopäätökset; käymällä läpi pelkästään nämä johtopäätökset lukija voi saada käsityksen raportin keskeisimmistä tuloksista hyvin tiiviissä muodossa. Kunkin pääluvun alussa on kursivilla ladottu johdantokappale, jossa on kerrottu lyhyesti kyseisessä luvussa käytetyistä tutkimusmenetelmistä.

Yhteenvedon alkuperäisessä englanninkielisessä versiossa eri tutkimustulosten luotettavuutta on kuvattu viisiportaisella sanallisella asteikolla¹. Monissa tapauksissa esitetyille tuloksille ja johtopäätöksille on annettu myös todennäköisyysarvio². Tällaisten luotettavuus- ja todennäköisyysarvioitten jatkuvasti toistuva kaavamainen käyttö tekee kuitenkin tekstistä hyvin raskaslukuista, joten tuota esitystapaa ei ole käytetty käsillä olevassa suomenkielisessä versiossa kovin paljoa. Silloin kun tulos on tieteellisesti epävarma, se on pyritty tuomaan suomenkieleen esiin muilla tavoin.

Tämä päätöksentekijöille laadittu yhteenveto perustuu varsinaisessa raportissa ja sen teknillisessä yhteenvedossa esitettyihin tietoihin. Kunkin asiakohdan loppuun on merkitty suluissa { } se raportin kohta, missä aihetta on käsitelty tarkemmin.

B. Ilmaston tähänastiset muutokset havaintojen perusteella

Ilmastojärjestelmän eri osista (ilmakehä, meret, jäätiköt jne.) saadaan havaintotietoa sekä tekemällä mittauksia paikan päällä että hyödyntämällä erilaisia kaukokartoitusmenetelmiä (esimerkkinä tekokuumittaukset). Lämpötilasta ja eräistä muistakin ilmastosuureista mittauksiin pohjautuvaa tietoa eri puolilta maapalloa on olemassa 1800-luvun puolivälistä alkaen. Kattavammin ja monipuolisemmin havaintotietoja on kuitenkin saatavilla vasta vuoden 1950 jälkeiseltä ajalta. Muinaisia eliö- ja kasvijäänteitä, meren pohjakerrostumia ym. tutkimalla voidaan muodostaa käsitys ilmastovaihteluista satojen ja jopa miljoonien vuosien ajalta. Eri tietolähteitä yhdistelemällä saadaan varsin hyvä kuva ilmastovaihteluista ja pitkäaikaisista muutoksista niin ilmakehässä, merissä, jäätiköissä kuin maan pintakerroksessakin.

¹Englanninkielisessä versiossa käytetty luotettavuusasteikko: “very low confidence”, “low confidence”, “medium confidence”, “high confidence” ja “very high confidence”

²IPCC:n käyttämä todennäköisyysasteikko: käytännössä varma (virtually certain), kun muutoksen tms. todennäköisyys on 99–100 %; hyvin todennäköinen (very likely) 90–100 %; todennäköinen (likely) 66–100 %; todennäköisyys yhtä suuri puolesta ja vastaan (about as likely as not) 33–66 %; epätodennäköinen (unlikely) 0–33 %; hyvin epätodennäköinen (very unlikely) 0–10 %; äärimmäisen epätodennäköinen (exceptionally unlikely) 0–1 %. Näitten ohella raportissa on käytetty eräitä muitakin todennäköisyyksien nimityksiä.

Ilmasto on lämpiämässä — siitä ei enää ole epäilystä. 1900-luvun puolivälin jälkeisenä aikana on voitu havaita muutoksia maapallon ilmastojärjestelmän kaikissa osissa. Ilmakehä ja meret ovat lämmenneet, lunta ja jäätä on entistä vähemmän, meren pinta on kohonnut, ja kasvihuonekaasujen pitoisuudet ilmakehässä ovat kasvaneet. Jotkut muutoksista ovat olleet niin suuria, että vastaavaa ei ole koettu tuhansiin vuosiin (kuvat SPM.1–4).{2.2, 2.4, 3.2, 3.7, 4.2–4.7, 5.2, 5.3, 5.5–5.6, 6.2, 13.2}

B.1 Ilmakehä

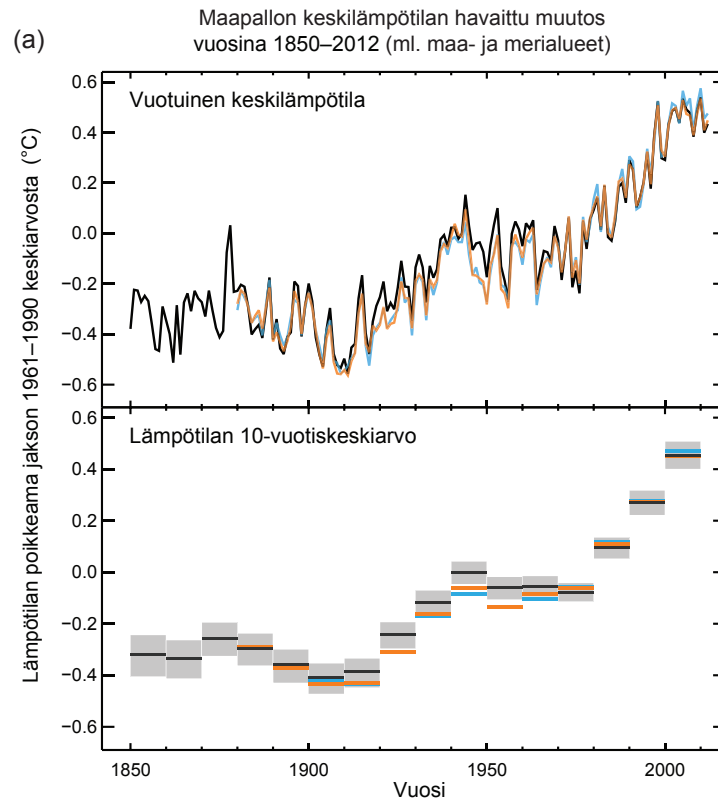
Viimeksi kuluneet kolme vuosikymmentä ovat olleet kukin vuorollaan lämpimämpiä kuin yksikään aikaisempi vuosikymmen 1800-luvun puolivälin jälkeen (kuva SPM.1). Pohjoisella pallonpuoliskolla 30-vuotisjakso 1983–2012 on todennäköisesti ollut lämpimin vähintäänkin 1400 vuoteen.{2.4, 5.3}

- Kun lasketaan lämpötilan muutokselle lineaarinen trendi, maapallon keskilämpötilan voidaan todeta nousseen vuodesta 1880 vuoteen 2012 noin 0.85 [epävarmuusväli 0.65–1.06] astetta ($^{\circ}\text{C}$)³. Tältä ajalta on olemassa riittävästi havaintotietoa, jotta maapallon keskilämpötila voidaan laskea, ottaen mukaan sekä maa- että merialueet. Eri menetelmiä käyttäen on luotu useita vaihtoehtoisia maapallon keskilämpötilan havaintoaikasarjoja. Näistä havaintoaikasarjoista pisimmän perusteella maapallon keskilämpötilan muutos jaksojen 1850–1900 ja 2003–2012 välillä oli 0.78 [0.72–0.85] astetta⁴ (kuva SPM.1).{2.4}
- Lämpötilojen alueellisia trendejä voidaan laskea kohtuullisen luotettavasti vuodesta 1901 lähtien. Tänä aikana lämpötila on ollut nousussa lähes kaikkialla maapallolla (kuva SPM.1).{2.4}
- Vaikka ilmasto pitkällä aikavälillä selvästi lämpeneekin, lämpötilat heilahtelevat vuodesta ja vuosikymmenestä toiseen (kuva SPM.1). Tällaisen luonnollisen vaihtelun takia lyhyistä aikasarjoista lasketut trendit eivät yleensä anna oikeaa kuvaa ilmaston kehityksestä. Lyhyelle ajanjaksolle lasketut trendit riippuvat usein voimakkaasti tarkastelujakson alku- ja loppuhetken valinnasta. Esimerkiksi vuonna 1998 voimakas El Niño -ilmiö nosti maapallon keskilämpötilan poikkeuksellisen korkeaksi. Sen tähden vuosien 1998–2012 havaintojen perusteella laskettu maapallon keskilämpötilan trendi on niinkin pieni kuin 0.05 [–0.05–0.15] $^{\circ}\text{C}$ /vuosikymmenessä. Tämä on selvästi vähemmän kuin pidemmän jakson eli vuosien 1951–2012 lämpötiloihin perustuva trendi 0.12 [0.08–0.14] $^{\circ}\text{C}$ /vuosikymmenessä⁵.{2.4}

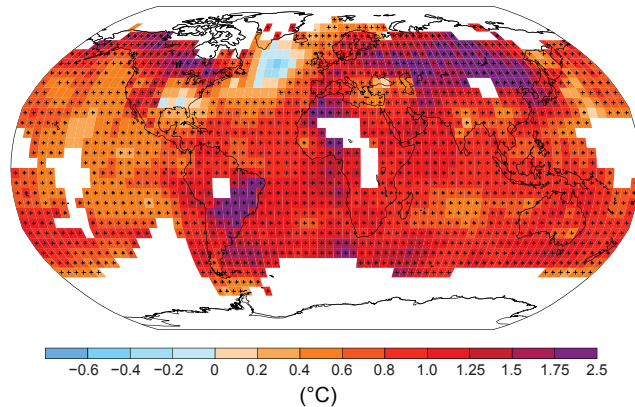
³Tässä yhteenvedossa esitetyille tuloksille on useimmissa tapauksissa annettu parhaan arvion ohella myös epävarmuusväli hakasuluissa []. Ellei toisin ole mainittu, kyseessä on 90 %:n todennäköisyysväli, eli suureen todellisen arvion katsotaan osuvan tämän epävarmuushaarukan sisään 90 %:n todennäköisyydellä. Todennäköisyys, että oikea arvo jäisi haarukan alarajaa pienemmäksi, on 5 %; ylärajan ylittymisen todennäköisyys on samaiset 5 %. Epävarmuuden jakautuminen parhaan arvion ympärillä ei välttämättä ole symmetristä.

⁴Maapallon keskilämpötilan muutoksen arvioimiseen on käytetty kahta erilaista menetelmää. Ensimmäisessä vaihtoehdossa sovitetaan aikasarjaan (vuodet 1880–2012) lineaarinen trendi. Toista yksinkertaisempaa laskutapaa sovellettaessa lasketaan lämpötilan aikakeskiarvo kahdelta jaksolta (tässä 1850–1900 ja 2003–2012) ja määrätään muutos näitten keskiarvojen erotuksena. Eri laskutapojen antamat tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia.{2.4}

⁵Käytettäessä laskennassa aloitusvuotta 1995 saadaan maapallon keskilämpötilan 15-vuotiseksi trendiksi 0.13 [0.02–0.24] $^{\circ}\text{C}/10$ v. Vastaavasti vuodesta 1996 alkava 15-vuotinen trendi on 0.14 [0.03–0.24] $^{\circ}\text{C}/10$ v ja vuodesta 1997 alkava 0.07 [–0.02–0.18] $^{\circ}\text{C}/10$ v.



(b) Pintalämpötilan havaittu muutos vuosina 1901–2012



Kuva SPM.1. (a) Havaintoihin perustuva maapallon keskilämpötilan vaihtelu vuosina 1850–2012. Keskilämpötilaa laskettaessa on otettu mukaan sekä maa- että merialueet, ja lämpötilat on esitetty poikkeamina jakson 1961–1990 keskiarvosta. Kuvan ylemmässä osassa on esitetty vuosittaiset ja alemmassa kymmenvuotisjaksojen keskilämpötilat. Molemmat on annettu erikseen kolmen eri tutkimuskeskuksissa lasketun maapallon keskilämpötilan aikasarjan mukaisina. Kymmenvuotiskeskisarvoja esittävään kuvaan on merkitty harmaalla varjostuksella pisimmän käytettävissä olleen havaintosarjan perusteella laskettu keskilämpötilan epävarmuusväli. (b) Vuotuisen keskilämpötilan muutos vuodesta 1901 vuoteen 2012 eri puolilla maapalloa lineaarisen muutostrendin perusteella laskettuna. Lämpötilan muutos on esitetty vain niille alueille, joilta on saatavissa riittävästi havaintotietoa, ja muut alueet on jätetty valkoisiksi. Alueet, joilla lämpötilan muutos on todettu tilastollisesti merkitseväksi 10 %:n tasolla, on merkitty ristein.{kuvat 2.19–2.21; kuva TS.2}

Taulukko SPM.1. (1) Eräitten sään ääri-ilmiöitten esiintymisen tähänastiset muutokset (yleensä vuoden 1950 jälkeen, ellei ole toisin mainittu) todennäköisyyksinä ilmaistuna; (2) todennäköisyys sille, että ihmiskunnan tuottamat päästöt ovat vaikuttaneet havaitun muutoksen syntyyn; (3) todennäköisyys sille, että ilmiön esiintymisessä on odotettavissa muutoksia vuosisadan alkupuolella (v. 2016–2035) ja (4) vuosisadan lopulla (v. 2081–2100). Tulevat muutokset on laskettu suhteessa jakson 1986–2005 keskiarvoon eri RCP-skenaariotien perusteella (tietolaatikko SPM.1). Ääri-ilmiöitten määritelmät on esitetty varsinaiseen raporttiin kuuluvassa sanasto-osassa. (Alkuperäinen taulukko sisälsi myös vertailuja IPCC:n aikaisempiin raportteihin, mutta ne on jätetty selvyiden vuoksi pois. Samalla on jätetty pois osa taulukkoon liittyvistä täydentävistä selityksistä.){2.6, 3.7, 7.6, 10.6, 11.3, 12.4, 13.7, 14.6}

Ilmiö, trendin suunta	Tähänastinen muutos	Ihmisten vaikutus	Muutos 2016–35	Muutos 2081–2100
Entistä vähemmän (ja/tai entistä leudompia) kylmiä päiviä ja öitä useimmilla maa-alueilla	Hyvin todennäköistä	Hyvin todennäköistä	Todennäköistä	Käytännössä varmaa
Entistä enemmän (ja/tai entistä kuumempia) kuumia päiviä ja öitä useimmilla maa-alueilla	Hyvin todennäköistä	Hyvin todennäköistä	Todennäköistä	Käytännössä varmaa
Helleaalot yleistyvät ja/tai pidentyvät useimmilla maa-alueilla	Todennäköistä suuressa osassa Eurooppaa, Aasiaa ja Australiaa	Todennäköistä ^a	Ei esitetty todennäköisyysarviota ^b	Hyvin todennäköistä
Rankkasateet yleistyvät tai voimistuvat useimmilla alueilla	Maa-alueilla todennäköisesti yleisemmin lisääntyneet kuin vähentyneet ^c	Melko luotettavasti kyllä	Todennäköistä useimmilla maa-alueilla	Hyvin todennäköistä useimmilla keskileveysasteitten maa-alueilla ja runsassateisilla trooppisilla alueilla
Kuivuuskaudet pitenevät ja/tai voimistuvat	Todennäköistä (joilakin alueilla) ^d	Epävarmaa	Epävarmaa ^g	Todennäköistä (luultavasti sekä alueellisesti että maailmanlaajuisesti) ^h
Entistä enemmän voimakkaita trooppisia hirmumyrskyjä	Lähes varmaa Pohjois-Atlannilla 1970-luvulta lähtien	Epävarmaa ⁱ	Epävarmaa	Todennäköisyys yli 50 % läntisellä Tyynellä merellä ja Pohjois-Atlannilla ^j
Meren pinta nousee hyvin korkealle entistä useammin	Todennäköistä (vuodesta 1970)	Todennäköistä ^k	Todennäköistä ^l	Hyvin todennäköistä ^l

^a Päätelmä perustuu olemassaoleviin tapaustutkimuksiin. Joillakin alueilla helleaaltojen esiintyminen on todennäköisesti yli kaksinkertaistunut ihmiskunnan kasvihuonekaasupäästöjen vuoksi.

^b Mallien mukaan helleaalot voimistuvat, kestävät kauemmin ja ulottuvat laajemmille alueille jo lähitulevaisuudessa.

^c Trendit ovat luotettavia vain Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa, missä kovat sateet näyttävät yleistyneen tai voimistuneen, joskin vaihtelevasti alueesta ja vuodenaikasta riippuen. Kaikkein ilmeisimpiä muutokset ovat Pohjois-Amerikan keskiosissa.

^d Kuivuutta näyttäisi esiintyneen Välimeren maissa ja Länsi-Afrikassa entistä enemmän, kun taas Pohjois-Amerikan keskiosissa ja Luoteis-Australiassa sitä on ollut entistä vähemmän.

^g Maaperän vesisisällön muutoksia koskevat ennusteet ovat hyvin epävarmoja.

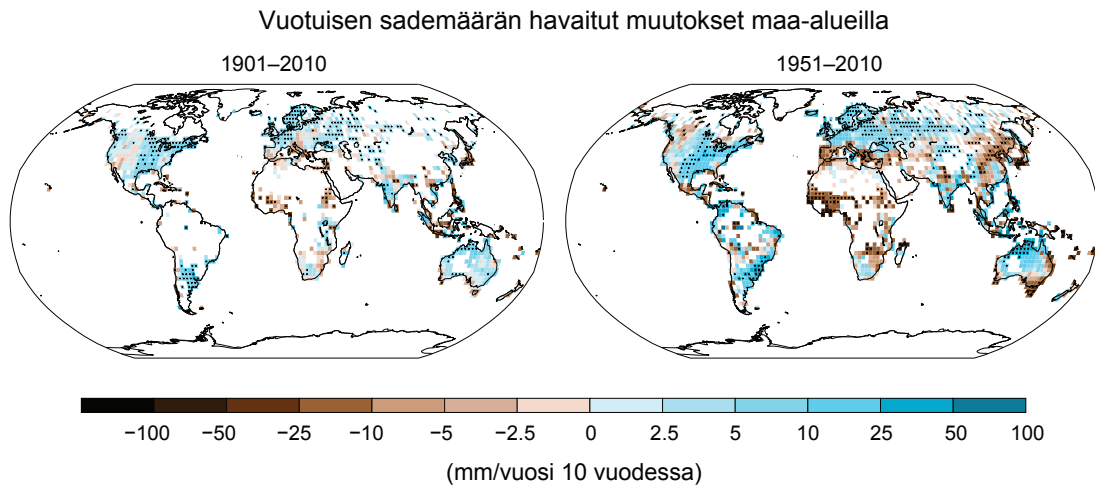
^h RCP8.5-skenaarion toteutuessa maaperän kuivumista olisi mallien mukaan odotettavissa jo nykyisin kuivuuden vaivaamilla alueilla. Välimeren ympäristöön, Yhdysvaltain lounaisosaan ja eteläiseen Afrikkaan ennustettu maaperän kuivuminen on sopusoinnussa Hadley-kiertoliikkeen ennustettujen muutosten ja lämpötilan nousun kanssa.

ⁱ Pidetään mahdollisena, että hiukkaspakotteen heikentyminen Pohjois-Atlantin alueella olisi vaikuttanut myrskyjä voimistavasti.

^j Perustuu mm. asiantuntijoiden arvioihin sekä aiempiin A1B-skenaarion mukaisiin mallikokeisiin.

^k Perustuu siihen, että merenpinnan keskimääräiset ja äärimmäiset korkeudet riippuvat vahvasti toisistaan.

^l Meren pinnan ajoittainen kohoaminen hyvin korkealle liittyy ensisijaisesti pinnan keskimääräiseen nousuun. Myrskyisyyden muutosten paikallisesta tai alueellisesta vaikutuksesta ei ole riittävää näyttöä.



Kuva SPM.2. Havaintoihin perustuvat vuotuisen sademäärän muutostrendit eri puolilla maapalloa vuosina 1901–2010 (vasen kuva) ja 1951–2010 (oikea kuva). Alueet, joilta havaintotietoa on riittämättömästi luotettavan arvion muodostamiseksi, on jätetty valkoisiksi. Tilastollisesti merkitsevän muutoksen alueet on merkitty ristein (10 %:n merkitsevyystaso). Muutoksen yksikkö: mm/vuosi kymmenessä vuodessa. {TS TFE.1, kuva 2; kuva 2.29}

- Keskiajan lämpöjakson aikana vuosina 950–1250 lämpötilat ovat mitä ilmeisimmin olleet joillakin alueilla ajoittain yhtä korkeita kuin 1900-luvun lopulla. Korkeita lämpötiloja ei kuitenkaan esiintynyt samanaikaisesti eri puolilla maailmaa, toisin kuin viime vuosikymmeninä. {5.5}
- On käytännössä varmaa, että myös troposfääri (ilmakehän alin noin 10–15 kilometrin korkeuteen ulottuva kerros) on lämmennyt 1900-luvun puolivälin jälkeen. Troposfäärin lämpötilat tunnetaan tarkimmin pohjoisella pallonpuoliskolla (trooppisia alueita lukuunottamatta), muualla maailmassa huonommin. {2.4}
- Pohjoisen pallonpuoliskon keskileveysasteitten maa-alueilla sademäärät näyttävät keskimäärin kasvaneen. Merkkejä kasvusta on nähtävissä jo 1900-luvun alusta lukien, mutta luotettavana arviota voidaan pitää vasta vuoden 1951 jälkeen. Muualla maailmassa sademäärien muutokset ovat varsin epävarmoja (kuva SPM.2). {Teknillinen yhteenveto TFE.1, kuva 2; 2.5}
- Myös erilaisten äärevien sääilmiöitten esiintymisessä on havaittu muutoksia 1900-luvun puolivälin jälkeen (yksityiskohtaisempaa tietoa taulukossa SPM.1). Kylmät päivät ja yöt ovat harvinaistuneet ja vastaavasti lämpimät päivät ja yöt yleistyneet⁶. Helleaaltoja esiintyy ilmeisesti entistä useammin suuressa osassa Eurooppaa, Aasiaa ja Australiaa. Rankkasateet näyttävät yleistyneen ja voimistuneen ainakin Pohjois-Amerikassa ja Euroopassa. Muille maanosille ei ole mahdollista esittää kovin luotettavia arvioita. Kuitenkin sellaiset maa-alueet, joilla kovat sateet ovat lisääntyneet, näyttäisivät olevan enemmistönä. {2.6}

⁶Käsitteet “kylmä yö” jne. on määritelty tarkemmin varsinaisen raportin yhteydessä olevassa sanastossa.

B.2 Meret

Ilmaston lämmitessä maapallon ilmastojärjestelmän sisältämän lämpöenergian määrä kasvaa. Tästä lisäenergiasta valtaosa, vuosina 1971–2010 yli 90 %, on varastoitunut meriin. Voidaan pitää käytännössä varmana, että viimeisten 40 vuoden aikana merien ylimmät kerrokset pinnalta 700 metrin syvyyteen ovat lämmenneet (kuva SPM.3). Lämpeneminen on todennäköisesti lähtenyt käyntiin jo aikaisemmin, vuosien 1870 ja 1971 välisenä aikana. {3.2; varsinaisen raportin tietolaatikko 3.1}

- Koko maapalloa tarkasteltaessa merissä on eniten lämmennyt pinnalta 75 metrin syvyyteen ulottuva vesikerros. Vuosina 1971–2010 tämän kerroksen lämpötila nousi keskimäärin 0.11 [0.09–0.13] astetta vuosikymmenessä. Arvio on luotettavampi kuin edellisessä IPCC-arviointiraportissa, sillä mittauksissa esiintyneitä systemaattisia virheitä on saatu karsittua. {3.2}
- Myös 700 ja 2000 metrin välinen meren kerros on vuosina 1957–2009 todennäköisesti lämmennyt. Kahta kilometriä syvemmältä luotettavaa havaintotietoa sen sijaan on käytettävissä vasta vuosilta 1992–2005. Tänä aikana 2–3 km syvyydessä ei ole havaittavissa tilastollisesti merkitsevää lämpenemistä. Sen sijaan meren pohjimmaisat kerrokset yli kolmen kilometrin syvyydessä näyttäisivät lämmenneen, eritoten Eteläisen jäämeren alueella. {3.2}
- Ilmaston lämmitessä maapallon ilmastojärjestelmä sisältää entistä enemmän lämpöenergiaa. Viimeisen 40 vuoden aikana yli 60 % lisääntyneestä lämpöenergiasta on varastoitunut merien 700 metrin paksuiseen pintakerrokseen ja noin 30 % syvemmälle meriin. Pintakerroksen lämpöenergia on tänä aikana lisääntynyt $17 [15–19] \times 10^{22}$ joulella⁷ (kuva SPM.3). {3.2; tietolaatikko 3.1}
- Havaintojen perusteella pidetään mahdollisena, että merien 700 metrin paksuinen pintakerros olisi lämmennyt vuosina 2003–2010 hitaammin kuin sitä edeltävän kymmenen vuoden aikana (kuva SPM.3). Syvemmällä meressä (700–2000 m) lämpeneminen sen sijaan näyttää jatkuneen yhtä nopeana kuin aikaisemminkin. {3.2; tietolaatikko 9.2}
- Ne merialueet, joilla veden haihtuminen ylittää sademäärän, ovat muuttuneet 1900-luvun puolivälin jälkeen entistäkin suolaisemmiksi. Vastaavasti runsassateisilla merialueilla veden suolapitoisuus on alentunut. Suolapitoisuuksien muutokset näyttäisivät epäsuorasti vahvistavan käsitystämme, että sademäärien ja haihtumisen maantieteelliset jakaumat olisivat muuttuneet viime vuosikymmeninä. {2.5, 3.3, 3.5}
- Havaintojen perusteella ei voida sanoa, olisiko Atlantin valtameren meridionaalinen kiertoliike viime vuosikymmeninä mahdollisesti heikentynyt tai voimistunut. [Meridionaalisella eli termohaliinisella kiertoliikkeellä tarkoitetaan meren virtausta, jossa pinnan lähellä siirtyy lämmintä vettä kohti pohjoista ja syvemmällä jäähtynyttä vettä takaisin kohti etelää.] {3.6}

⁷Jos kaikkiin maailman meriin siirtyisi pinnalta käsin lämpöä keskimäärin 1 W/m^2 :n teholla, merien lämpöenergia lisääntyisi $1.1 \times 10^{22} \text{ J}$ vuodessa.

B.3 Jää ja lumi

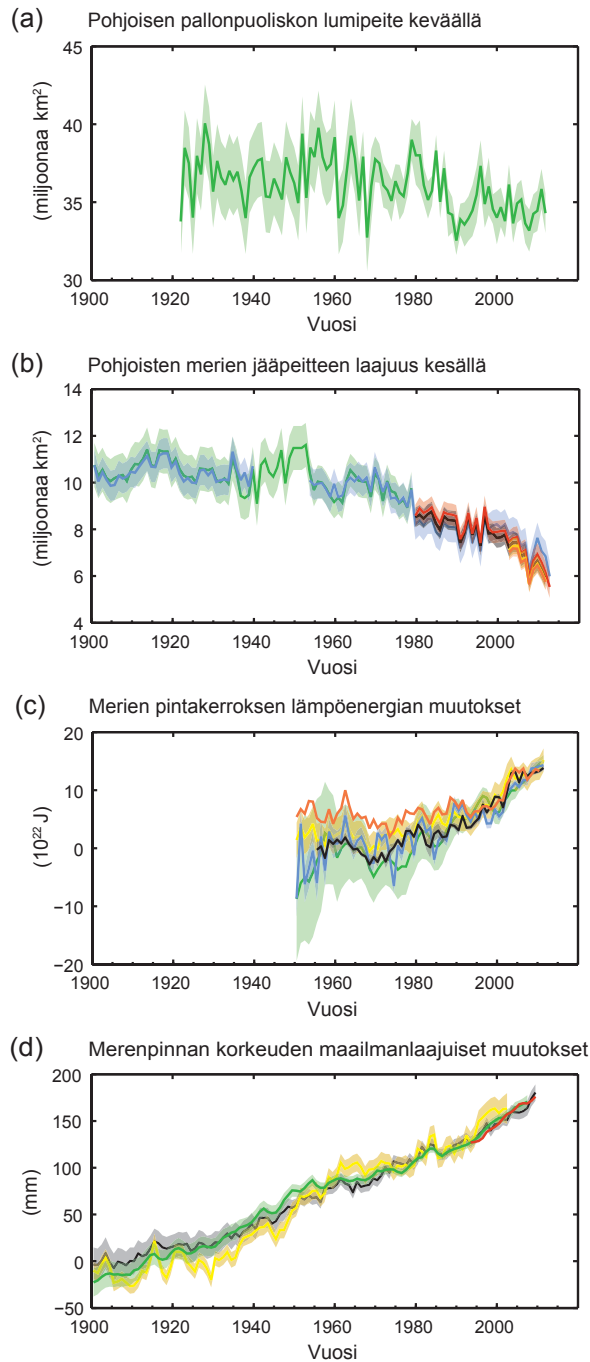
Viimeisten 20 vuoden aikana Grönlannin ja Etelämantereen mannerjäätiköitten massa on pienentynyt ja myös vuoristojäätiköt ovat edelleen kutistuneet lähes kaikkialla maailmassa. Samalla Pohjoisen jäämeren jääpeitteen ja pohjoisen pallonpuoliskon maa-alueitten kevätaikaisen lumipeitteen pinta-alat ovat pienentyneet (kuva SPM.3).{4.2–4.7}

- Vuosina 1971–2009 eri puolilla maailmaa sijaitsevien vuoristojen jäätiköistä on kadonnut jäätä⁸ keskimäärin yhteensä 226 [91–361] miljardia tonnia vuodessa⁹. Vuosina 1993–2009 keskimääräinen massakato oli jo 275 [140–410] miljardia tonnia vuodessa¹⁰.{4.3}
- Grönlannin mannerjäätikön massakato on viime vuosikymmeninä hyvin todennäköisesti nopeutunut. Vuosina 1992–2001 jäätä menetettiin keskimäärin 34 [–6–74], vuosina 2002–2011 peräti 215 [157–274] miljardia tonnia vuodessa.{4.4}
- Etelämantereen jäätikön massan kato on todennäköisesti myös kiihtynyt: vuosien 1992–2001 30:stä [–37–97] vuosien 2002–2011 147 [72–221] miljardiin tonniin vuodessa. Jäätä on sulanut lähinnä Etelämantereen niemimaan pohjoisosissa ja Amundsenin meren rannikoilla.{4.4}
- Vuosina 1979–2012 Pohjoisen jäämeren jääpeitteen pinta-ala on pienentynyt huomattavasti. Keskimääräinen vuotuinen jään pinta-ala on todennäköisimmin pudonnut 3.5–4.1 prosenttia eli 0.45–0.51 miljoonaa neliökilometriä vuosikymmenessä. Jäätä on vähiten loppukesästä sulamiskauden päätyttyä. Tällaisen monivuotisen jään pinta-ala on vähentynyt vieläkin enemmän: 9.4–13.6 % eli 0.73–1.07 miljoonaa neliökilometriä vuosikymmenessä (kuva SPM.3). Jääpeite on supistunut muinakin vuodenaikoina, ja jään hupeneminen on jatkunut vuosikymmenestä toiseen. Näyttää siltä, että pohjoisilla merillä ei ole ollut kesäisin näin vähän jäätä eikä merivesi näin lämmintä ainakaan 1450 vuoteen.{4.2, 5.5}
- Eteläisen jäämeren keskimääräinen vuotuinen jääpeitteen kokonaispinta-ala on puolestaan laajentunut vuosina 1979–2012 keskimäärin 1.2–1.8 % (0.13–0.20 miljoonaa neliökilometriä) vuosikymmenessä. Joillakin alueilla jäät ovat lisääntyneet, toisaalla vähentyneet.{4.2}
- Pohjoisella pallonpuoliskolla lumen peitossa oleva alue on pienentynyt 1900-luvun puolivälin tienoilta alkaen (kuva SPM.3). Vuosina 1967–2012 lumipinta-ala pienentyi maaliskuuhun 1.6 [0.8–2.4] ja kesäkuuhun 11.7 [8.8–14.6] prosenttia vuosikymmenessä. Tilastollisesti merkitsevää lumialan lisääntymistä ei tuona ajanjaksona havaittu yhtenäkkään kuukauteen.{4.5}
- Ikiroudassa olevan maan lämpötila on varsin suurella varmuudella kohonnut laajoilla alueilla 1980-luvun alkupuolelta lähtien. Pohjois-Alaskassa lämpötila on paikoin noussut jopa 3°C ja Euroopan puoleisen Venäjän pohjoisosissa 2°C. Vuosina 1975–2005 ikiroudan on havaittu Pohjois-Venäjällä myös ohentuneen ja ikirouta-alueen pinta-alan pienentyneen.{4.7}
- Monet erityyppiset havainnot osoittavat, että pohjoinen napaseutu on lämmennyt 1900-luvun puolivälin jälkeen todella rajusti.{Tietolaatikko 5.1; 10.3}

⁸Tämä tarkoittaa jään ”nettomääräistä” vähenemistä: jään massan muutos = lumisateista aiheutuva jäätikön kasvu – (jään sulaminen + jäävuorten lohkeaminen (rannikoilla)).

⁹Näissä lukemissa ei ole mukana Grönlannin ja Etelämantereen reuna-alueilla sijaitsevien erillisten jäätikköjen osuutta. Mas-
sataselauksissa nämä jäätiköt on käsitelty yhdessä mannerjäätiköitten kanssa.

¹⁰Jäätiköitten 100 miljardin tonnin massakato vastaa maailmanlaajuisesti merenpinnan kohoamista 0.28 millimetrillä.



Kuva SPM.3. Ilmaston tähänastisia muutoksia kuvaavia aikasarjoja: (a) lumen peittämän alueen laajuus pohjoisella pallonpuoliskolla maaliskuu-huhtikuussa; (b) pohjoisten merialueitten jään pinta-ala heinä-syyskuun keskiarvona; (c) maapallon merien 700 metrin paksuisen pintakerroksen sisältämän lämpöenergian määrän muutos verrattuna vuoden 1970 tilanteeseen; (d) merenpinnan korkeuden maailmanlaajuisen keskiarvon muutos verrattuna v. 1900–1905 vallinneeseen tasoon. Eriväriset käyrät esittävät eri tietolähteistä peräisin olevia arvioita. Kaikki luvut ovat yksittäisten vuosien keskiarvoja, ja arvioitten epävarmuutta on havainnollistettu varjostuksella; aivan kaikille käyrille epävarmuusarviota ei tosin ole kyetty esittämään. {kuvat 3.2, 3.13, 4.19 ja 4.3; FAQ 2.1, kuva 2; kuva TS.1}

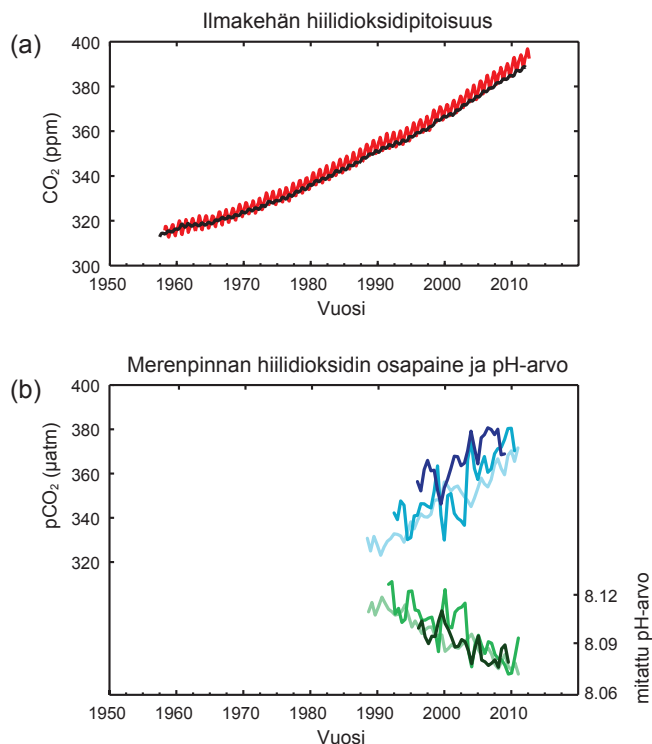
B.4 Merenpinnan korkeus

Meren pinta on kohonnut 1800-luvun puolivälin jälkeen nopeammin kuin viimeisten 2000 vuoden aikana keskimäärin. Keskimääräinen maailmanlaajuinen merenpinnan korkeus on noussut vuosien 1901 ja 2010 välisenä aikana 19 [17–21] cm (kuva SPM.3).{3.7, 5.6, 13.2}

- Sekä epäsuorat että suorat mittalaitteitten avulla tehdyt havainnot osoittavat, että merenpinnan kohoaminen nopeutui 1800-1900-luvun taitteen tienoilla oltuaan sitä ennen melko hidasta parintuhannen vuoden ajan. Vaikuttaa todennäköiseltä, että merenpinnan maailmanlaajuinen nousu on sen jälkeen edelleen nopeutunut.{3.7, 5.6, 13.2}
- Meren pinta on noussut vuodesta 1901 vuoteen 2010 keskimäärin 1.7 [1.5–1.8] mm vuodessa, mutta vuoden 1993 jälkeen vauhti on ollut jo 3.2 [2.8–3.6] mm vuodessa. Pinnan nousun kiihtyminen on nähtävissä sekä vedenkorkeusmittari- että tekokuuhavainnoissa. Pidetään todennäköisenä, että samantapainen nopea pinnan kohoamisen vaihe koettiin myös vuosina 1920–1950.{3.7}
- 1970-luvun alun jälkeen koetusta merenpinnan kohoamisesta suurin osa, noin 75 %, on aiheutunut vuoristojäätiköitten sulamisesta ja meriveden lämpölaajenemisesta. Vuosien 1993 ja 2010 välisenä aikana mitattu pinnan kohoaminen osuu varsin hyvin yksin niitten arvioitten kanssa, joita on laadittu pinnan nousua aiheuttavien yksittäisten tekijöitten osuuksille. Tuona aikana lämpölaajenemisen arvellaan nostaneen meren pintaa 1.1 [0.8–1.4] mm vuodessa, vuoristojäätiköitten sulamisen 0.76 [0.39–1.13], Grönlannin mannerjäätiköstä vapautuneen veden 0.33 [0.25–0.41], Etelämantereen jäätiköstä peräisin olevan veden 0.27 [0.16–0.38] ja manneralueitten vesivarantojen vähentymisen 0.38 [0.26–0.49] mm vuodessa. Nämä osuudet yhteen laskemalla saataisiin tulokseksi 2.8 [2.3–3.4] millimetrin pinnan nousu vuodessa.{13.3}
- Viime jääkautta edeltävän lämpökauden aikana 116 000 – 129 000 vuotta sitten meren pinta lainehti usean tuhannen vuoden ajan vähintäänkin 5 mutta ei kuitenkaan enempää kuin 10 metriä nykyistä korkeammalla; tieteellinen näyttö tästä on varsin vahva. Tuonaikaisesta merenpinnan kohoamisesta 1.4–4.3 metriä on selitettävissä Grönlantia peittäneen jäätikön osittaisella sulamisella. Tästä voidaan epäsuorasti päätellä, että jonkinsuuruisen osuuden vedenpinnan kohoamisesta on luultavasti täytynyt aiheutua Etelämantereen jäätiköstä vapautuneesta vedestä. Napaseutujen lämpötilat olivat tuollon tuhansia vuosia ainakin 2°C nykyistä korkeampia. Tuon aikakauden lämpimyys johtui luonnollisista tekijöistä, tarkemmin sanottuna maan kiertoradan ja pyörimisakselin kallistuskulman jaksollisista muutoksista kymmenien tuhansien vuosien aikana.{5.3, 5.6}

B.5 Hiilen kiertokulku ja kasvihuonekaasujen lisääntyminen

Hiilidioksidin, metaanin ja dityppioksidin pitoisuudet ilmakehässä ovat tätä nykyä korkeampia kuin koskaan vähintään 800 000 vuoteen. Hiilidioksidia on ilmakehässä nykyään 40 % enemmän kuin ennen teollistumisen aikaa. Tämä johtuu ensisijaisesti fossiilisten polttoaineitten käytöstä, osaksi myös maankäytön muutoksista. Noin 30 % ihmiskunnan tähän mennessä tuottamista hiilidioksidin päästöistä on imeytynyt meriin, mikä on johtanut meriveden happamoitumiseen (kuva SPM.4).{2.2, 3.8, 5.2, 6.2, 6.3}



Kuva SPM.4. Hiilen kiertokulun muutoksista kertovia mittaustuloksia: (a) ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden muuttuminen vuoden 1958 jälkeen Mauna Loalla Havaijilla (punainen käyrä) ja Etelänavalla (musta käyrä) tehtyjen mittausten perusteella; (b) meren pintakerrokseen liunneen hiilidioksidin osapaine (siniset käyrät) ja happamuutta ilmaiseva meriveden pH-arvo (vihreät käyrät). B-kuvan mittaukset on tehty kahdessa paikassa Atlantin valtamerellä (tummat ja keskivaaleat käyrät) sekä yhdessä pisteessä Tyynellä valtamereltä (vaaleimmat käyrät).{kuvat 2.1, ja 3.18; kuva TS.5}

- Ihmiskunnan aiheuttamat päästöt ovat lisänneet kasvihuonekaasujen määriä ilmakehässä 1700-luvulta lähtien. Vuonna 2011 ilman hiilidioksidipitoisuus oli 391 ppm¹¹, missä on luonnolliseen tasoon verrattuna lisäystä 40 %. Vastaavasti metaanin pitoisuus oli tuolloin 1803 ppb (lisäystä 150 %) ja dityppioksidin 324 ppb (lisäystä 20 %).{2.2, 5.2, 6.1, 6.2}
- Hiilidioksidin, metaanin ja dityppioksidin tämänhetkiset pitoisuudet ilmakehässä ovat huomattavasti korkeampia kuin milloinkaan viimeksi kuluneen 800 000 vuoden aikana. Vastaavasti kaasujen pitoisuuden keskimääräinen lisääntymisvauhti on nopeampaa kuin kertaakaan 22 000 vuoteen. Tieto aiemmin vallinneista pitoisuuksista perustuu kaasukoostumuksen mittauksiin, joita on tehty muuoin jäätiköitten sisään loukkuun jääneistä ilmakuplista.{5.2, 6.1, 6.2}
- Vuosina 2002–2011 fossiilisten polttoaineitten käyttö ja sementin tuotanto aiheuttivat yhdessä keskimäärin 8.3 [7.6–9.0] GtC hiilidioksidipäästöt vuodessa¹². Vuonna 2011 päästöjä kertyi jo 9.5

¹¹ppm = tilavuuden miljoonasosa ja ppb = tilavuuden miljardisosa. Tilavuusosuudet kertovat samalla, kuinka suuri kyseisen kaasun molekyylien osuus ilmassa on. Esimerkiksi 300 ppm:n hiilidioksidipitoisuus tarkoittaa, että miljoonasta ilmamolekyylistä 300 kpl on hiilidioksidimolekyyliä.

¹²Hiilen massana ilmaistu gigatonnin eli miljardin tonnin (=10¹⁵g) hiilidioksidipäästö (GtC) vastaa hiilidioksidin massana 3.667 gigatonnia (GtCO₂).

[8.7–10.3] GtC, eli 54 % enemmän kuin vuonna 1990. Maankäytön muutoksista (mm. trooppisten metsien hävittäminen) aiheutui vuosina 2002–2011 keskimäärin 0.9 [0.1–1.7] GtC:n vuotuiset nettopäästöt. Tämä arvio on siten suhteellisesti ottaen epätarkempi kuin tieto fossiilisiin polttoaineisiin liittyvistä päästöistä. {6.3}

- Vuosien 1750 ja 2011 välisenä aikana fossiilisista polttoaineista ja sementin tuotannosta on muodostunut yhteensä 375 [345–405] GtC:n verran hiilidioksidipäästöjä. Vastaavasti metsien hävityksestä ja muista maankäytön muutoksista on vapautunut hiilidioksidia 180 [100–260] GtC. Ihmiskunnan tähänastisten hiilidioksidipäästöjen kokonaismäärä on näin ollen 555 [470–640] GtC. {6.3}
- Ihmiskunnan aikojen kuluessa tuottamasta hiilidioksidista 240 [230–250] GtC on edelleen ilmakehässä, 155 [125–185] GtC on liuennut meriin ja loput 160 [70–250] GtC on päätyneet maaperään ja kasvipeitteeseen. Viimeksi mainittu arvo on laskettu jäännösterminä eli vähentämällä yhteenlasketuista hiilidioksidin päästöistä ilmakehään ja meriin päätyneen hiilidioksidin määrät. {Kuva TS.4; 3.8, 6.3}
- Merien happamoitumista voidaan tarkastella veden pH-arvon¹³ muutosten avulla. Meren pintakerroksen pH-arvo on laskenut teollistumisen alkuaikoihin verrattuna 0.1 yksiköllä, mikä vastaa 26 %:n lisäystä meriveden vetyionipitoisuudessa (kuva SPM.4). {3.8; tietolaatikko 3.2}

C. Ilmastoa muuttavat pakotteet

Tähänastiset ja tulevat ilmastomuutokset aiheutuvat monista erilaisista luonnollisista ja ihmisten toimintaan liittyvistä tekijöistä, jotka synnyttävät häiriöitä maapallon lämpötasapainoon. Eri tekijöitten vaikutukset voidaan ilmaista numeromuodossa kunkin tekijän tuottaman säteilypakotteen¹⁴ avulla. Ellei toisinta, säteilypakotteelle esitettävät lukuarvot kertovat, miten kyseinen pakotteen aiheuttaja on muuttanut maapallon lämpöasetta verrattaessa vuoden 2011 tilannetta vuoteen 1750. Positiivinen säteilypakote lämmittää ja negatiivinen jähdyttää maapallon pintaa. Säteilypakotteen suuruutta voidaan arvioida joko suoraan paikan päältä pinnalta tai ilmakehästä tehtyjen mittausten tai kaukomittausten avulla, tutkimalta kasvihuonekaasujen ja ilmassa leijuvien pienhiukkasten fysikaalisia ominaisuuksia tai simuloimalla niiden vaikutuksia ilmastoon tietokonemallien avulla. Eräät ilmakehään päästetyt kaasut voivat aiheuttaa säteilypakotetta epäsuorasti vaikuttamalla varsinaisten kasvihuonekaasujen pitoisuuksiin. Kokonais-säteilypakote voidaan jakaa eri pakotetekijöitten aiheuttamiin osuuksiin kahdella eri tavalla. Perinteisen lähestymistavan mukaan tarkastellaan suoraan eri aineitten pitoisuuksien muutoksia¹⁵. Vaihtoehtoisesti

¹³pH-arvo ilmaisee liuoksen happamuuden logaritmisella asteikolla. Yhden yksikön pudotus pH:ssa merkitsee liuoksen vetyionipitoisuuden kymmenkertaistumista.

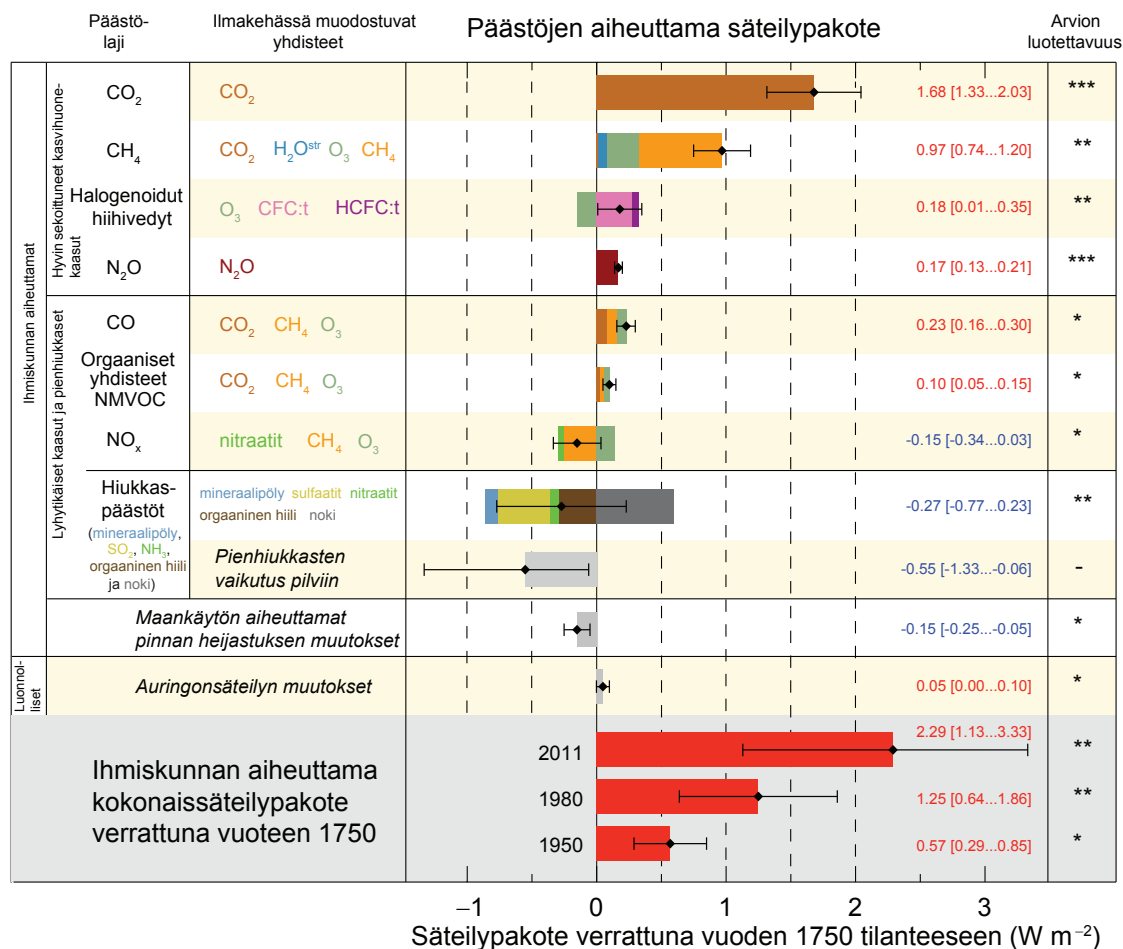
¹⁴Kuten aikaisemmissa IPCC-raporteissakin, säteilypakotteen yksikkö on Wm^{-2} . Säteilypakote kuvaa kunkin pakotetekijän aiheuttamaa maapallon säteilytaseen (maapallolle saapuvan ja sieltä lähtevän säteilyn erotus) muutosta, joka voidaan laskea joko tropopausin korkeudella tai ilmakehän ylärajalla. Säteilypakotteen perinteisen laskentatavan mukaan olosuhteet, kuten lämpötila, maan pinnalla ja troposfäärissä pidetään ilmakehän koostumuksen muuttuessa vakioina; tätä laskentatapaa käytettiin edellisissä IPCC-raporteissa. Tässä raportissa säteilypakotteen laskentamenetelmää on kehitetty niin, että pienhiukkasten ja pitkäikäisten kasvihuonekaasujen synnyttämää säteilypakotetta laskettaessa kaikkien muitten suureitten paitsi meren pinnan lämpötilan ja merien jääpeitteen annetaan sopeutua ilmakehän muuttunutta koostumusta vastaaviksi. Näin saatua pakotteen arvoa kutsutaan tehoisaksi säteilypakotteeksi. Tutkittaessa tehoisaa säteilypakotetta saadaan perinteiseen lähestymistapaan verrattuna parempi käsitys kunkin yksittäisen pakotetekijän aiheuttamasta lämpötilan muutoksesta. Muita pakotetekijöitä kuin pienhiukkasia ja pitkäikäisiä kasvihuonekaasuja tarkasteltaessa nopeasti toteutuvien sopeutumisilmiöitten merkitys on pienempi, joten näitä säteilypakotteen tekijöitä laskettaessa käytetään edelleen säteilypakotteen perinteistä määritelmää. {8.1}

¹⁵Tätä tapaa käytettiin mm. edellisessä IPCC-raportissa päätöksentekijöille tuotetussa yhteenvedossa.

on mahdollista tutkia, miten säteilypakote jakautuu kunkin kaasun ja erityyppisten hiukkasten päästöistä aiheutuviin osuuksiin; tällä tavoin pystytään helpommin arvioimaan erilaisten ihmiskunnan ilmastoa muuttavien toimien vaikutusta. Säteilypakotteen kokonaisarvo on molempia tapoja käytettäessä sama. Tässä yhteenvedossa käytetään kumpaakin tarkastelutapaa, valtaosin kuitenkin jälkimmäistä eli eri aineitten päästöihin pohjautuvaa jakoa.

Kaikkien ilmastoa muuttavien tekijöitten yhdessä aiheuttama kokonaissäteilypakote on positiivinen, mikä takia ilmastojärjestelmän sisältämän lämpöenergian määrä lisääntyy koko ajan. Suurin yksittäinen lämmittävän säteilypakotteen aiheuttaja on ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden lisääntyminen teollistumista edeltävästä ajasta 1700-luvulla nykypäivään (kuva SPM.5).{3.2; tietolaatikko 3.1; 8.3, 8.5}

- Ihmiskunnan päästöistä aiheutuvan säteilypakotteen kokonaisarvo oli vuonna 2011 (vertailukohtana vuosi 1750) $2.29 [1.13-3.33] \text{ Wm}^{-2}$ (kuva SPM.5). Vuoden 1970 jälkeen pakote on kasvanut nopeammin kuin sitä edeltävinä vuosikymmeninä. Tämänhetkinen parhaan arvion mukainen säteilypakote (2.29 Wm^{-2}) on 43 % suurempi kuin edellisessä IPCC-raportissa julkaistu vuoden 2005 tilannetta kuvaava arvio. Säteilypakotelle annetun arvon suurentuminen johtuu osittain siitä, että useimpien kasvihuonekaasujen pitoisuudet ovat tällä välin kohonneet. Toinen tärkeä syy on, että uusimpien tutkimusten valossa pienhiukkasten jäähdyttävä vaikutus näyttäisi olevan vähäisempää kuin mitä aiemmin oli arvioitu.{8.5}
- Päästöjen perusteella laskien ilmakehään tasaisesti sekoittuneitten kasvihuonekaasujen eli hiilidioksidin (CO_2), metaanin (CH_4), dityppioksidin (N_2O) ja halogenisoiotujen hiilivetyjen osuus säteilypakotteesta on $3.00 [2.22-3.78] \text{ Wm}^{-2}$ (kuva SPM.5). Vastaavasti näitten kaasujen pitoisuuksien lisääntymisen perusteella laskien säteilypakoteosuudeksi saataisiin $2.83 [2.26-3.40] \text{ Wm}^{-2}$.{8.5}
- Pelkistä ilmakehään kertyneistä hiilidioksidin päästöistä aiheutuu säteilypakotetta $1.68 [1.33-2.03] \text{ Wm}^{-2}$ (kuva SPM.5). Kun otetaan huomioon muittenkin hiiltä sisältävien kaasujen päästöt, joista niistäkin lopulta muodostuu hiilidioksidia ilmakehään, hiilidioksidin pitoisuuden kasvusta aiheutuvaksi säteilypakoteosuudeksi saadaan $1.82 [1.46-2.18] \text{ Wm}^{-2}$.{8.3, 8.5}
- Metaanin päästöistä on koitunut säteilypakotetta kaiken kaikkiaan $0.97 [0.74-1.20] \text{ Wm}^{-2}$ (kuva SPM.5). Tämä on huomattavasti suurempi lukema kuin puhtaasti metaanin pitoisuuden kasvun perusteella laskettu $0.48 [0.38-0.58] \text{ Wm}^{-2}$. Ero johtuu siitä, että metaani on mukana monissa ilmakehän kemiallisissa reaktioissa, joitten seurauksena mm. otsonin ja stratosfäärin sisältämän vesihöyryn määrä on kasvanut.{8.3, 8.5}
- Stratosfäärin otsonikerrosta tuhoavien halogenisoiotujen hiilivetyjen päästöt ovat aiheuttaneet nettomääräisesti $0.18 [0.01-0.35] \text{ Wm}^{-2}$:n lämmittävän säteilypakotteen (kuva SPM.5). Kaasujen oma kasvihuoneilmiötä voimistava vaikutus on näin ollen suurempi kuin niitten aiheuttamasta otsonikadosta johtuva jäähdytys. Edelliseen IPCC-raporttiin verrattuna varsinaisten CFC-kaasujen (freonit) tuottama pakote on pienentynyt mutta niitten korvaajina käytettyjen muitten yhdisteitten pakote on vastaavasti kasvanut suunnilleen saman verran.{8.3, 8.5}
- Joittenkin lyhytikäisten kaasujen päästöt vaikuttavat säteilypakotteeseen epäsuorasti. Häkäkaasun (CO) päästöt pyrkivät lämmittämään ilmastoa mm. edesauttamalla otsonin syntyä ja pidentämällä metaanin elinikää ilmakehässä. Typen oksidien (NO_x ; tähän ryhmään ei ole sisällytetty dityppioksidia N_2O) päästöjen vaikutus taas on ilmeisesti ollut jäähdyttävä, sillä ne muun muassa jouduttavat metaanin hajoamista (kuva SPM.5).{8.3, 8.5}



Kuva SPM.5. Erilaisten ilmastoa muuttavien tekijöitten aiheuttamat säteilypakotteet maapallonlaajuisina keskiarvoina. Säteilypakotteet on jaoteltu eri yhdisteitten ja yhdisteryhmien päästöjen mukaan. Paras arvio kunkin aineen päästöjen aiheuttamasta säteilypakotteesta on merkitty pylväisiin mustalla pisteellä ja tämän arvion epävarmuushaarukka janalla. Kuvan oikeassa reunassa on annettu säteilypakotteen komponenttien arvot epävarmuusväleineen numeromuodossa sekä subjektiivinen arvio tuloksen luotettavuudesta (kolme tähteä – ilmiö tunnetaan hyvin, . . . , ei tähtiä – tunnetaan vielä puutteellisesti). Nokihiukkasista aiheutuva lumen ja jään heijastuskyvyn pieneneminen on sisällytetty samaan pylvääseen nokihiukkasten muitten vaikutusten kanssa. Hyvin pieniä pakotetekijöitä, kuten lentokoneitten tiivistymisjuovia (0.05 Wm⁻²) ynnä HFC- ja PFC-kaasuja sekä rikkiheksafluoridia (kolmen viimeksimainitun aiheuttama säteilypakote on yhteensä 0.03 Wm⁻²) ei ole otettu kuvaan mukaan. Säteilypakotteen jakautuminen eri kaasujen pitoisuuksien muutosten aiheuttamiin osiin saadaan selville laskemalla yhteen samanväriset osat eri pylväistä. Tulivuorenpurkausten aiheuttamaa säteilypakotetta ei ole kuvassa näytetty, koska sen suuruus vaihtelee tavattoman paljon vuodesta toiseen, eikä sitä siksi voida suoraviivaisesti verrata muihin pakotetekijöihin. Kuvan alaosassa on esitetty punaisiin pylväin nykyiseen tietämykseen perustuva arvio ihmiskunnan tuottamasta kokonaissäteilypakotteesta vuosina 1950, 1980 ja 2011. Kaikki muutokset on esitetty suhteessa vuonna 1750 vallinneeseen tilanteeseen. {8.5; kuvat 8.14–8.18; kuvat TS.6 ja TS.7}

- Erityyppisten pienhiukkasten eli aerosolien yhdessä tuottama säteilypakote on ilmeisesti jäähdyttävä, mutta arvio on varsin epätarkka: -0.9 [$-1.9 \dots -0.1$] Wm^{-2} . Pakotetta laskettaessa on otettu huomioon myös pienhiukkasten vaikutus pilvipisaroitten muodostumiseen. Useimpien hiukkasalalajien vaikutus on jäähdyttävä. Poikkeuksen tästä muodostaa musta hiili eli nokihiukkaset, jotka pyrkivät lämmittämään ilmastoa imemällä itseensä tehokkaasti auringon säteilyä. Tutkijat ovat varsin vakuuttuneita, että hiukkasten tuottama suora pakote ja niitten vuorovaikutus pilvipisaroitten kanssa ovat tähän mennessä osittain kumonnet kasvihuonekaasujen lisääntymisestä aiheutuvan lämmittävän vaikutuksen. Toisaalta hiukkaspakote muodostaa edelleenkin suurimman yksittäisen epävarmuustekijän arvioitaessa kokonaissäteilypakotteen suuruutta. {7.5, 8.3, 8.5}
- Tulivuorten stratosfääriin syyttämät pienhiukkaset voivat aiheuttaa purkausta seuraavina vuosina varsin suuren, joskin lyhytaikaisen jäähdyttävän säteilypakotteen. Vuosina 2008–2011 sattuneet useat pienet tulivuorenpurkaukset aiheuttivat keskimäärin -0.11 [$-0.15 \dots -0.08$] Wm^{-2} :n säteilypakotteen. Vuosina 1999–2002 purkauksia oli vähemmän, ja pakote jäi tuolloin puolta pienemmäksi. {8.4}
- Auringon säteilyn muutoksista 1700-luvulta nykypäivään arvioidaan aiheutuneen säteilypakotetta 0.05 [$0.00\text{--}0.10$] Wm^{-2} (kuva SPM.5). Vuosien 1978 ja 2011 välisenä aikana tehtyjen tekokuumittausten perusteella auringon säteilyteho oli viimeksi koetun auringonpilkkuminimin aikoihin v. 2008 hiukan alhaisempi kuin kahden edellisen minimin sattuessa. Tästä on aiheutunut säteilypakotteeseen -0.04 [$-0.08 \dots 0.00$] Wm^{-2} :n muutos vuosien 1986 ja 2008 auringonpilkkuminimien välillä. {8.4}
- Viimeksi kuluneen sadan vuoden aikana auringonsäteilyn muutoksista ja tulivuoritoiminnasta aiheutunut luonnollinen säteilypakote on ollut keskimäärin varsin pieni verrattuna kokonaissäteilypakotteeseen. Poikkeuksen tästä muodostavat voimakkaita tulivuorenpurkauksia välittömästi seuranneet vuodet. {8.5}

D. Ilmaston viimeaikaisten muutosten selittyminen

Tähänastisten ilmastonmuutosten syitten ymmärtämiseksi on tarkasteltava rinnan toistensa kanssa sekä kertynyttä havaintotietoa, palauteilmiöitä koskevia tutkimuksia että ilmastomallien tuloksia. Malleja ajettaessa tarvitaan tieto ilmastojärjestelmän eri osien tilasta simuloinnin alkuhetkellä sekä erilaisten luonnollisten ja ihmisten aiheuttamien ilmastoa muuttavien pakotetekijöitten kehitymisestä malliajon aikana. Havaintoaikasarjojen pidentyessä ja ilmastomallien kehittyessä on mahdollista tunnistaa ihmisten päästöjen vaikutus yhä useammassa ilmastojärjestelmän osassa.

Ihmiskunnan tuottamien päästöjen vaikutus on selvästi nähtävissä monissa ilmastojärjestelmän osissa. Kasvihuonekaasujen pitoisuuksien kasvu, lämmittävän säteilypakotteen voimistuminen ja havaittu ilmaston lämpeneminen ovat sopusoinnussa sen kanssa, miten ymmärrämme ilmastojärjestelmän toimivan. {2–14}

D.1 Ilmastomallit kehittyvät

Ilmastomallit ovat kehittyneet edellisen IPCC-raportin ilmestymisen jälkeen. Mallien avulla pystytään simuloimaan lämpötilan maantieteellisen jakauman suuren mittakaavan piirteet. Mallit kykenevät myös tuottamaan havaintojen kanssa sopusoinnussa olevia lämpötilan trendejä, esimerkkeinä maapallon lämpenemisen kiihtymisen 1900-luvun puolivälin jälkeen ja suuria tulivuorenpurkauksia seuranneet ohimevät viileämmät ajanjaksot.{9.4, 9.6, 9.8}

- Ilmastomallien keskimäärin tuottama maapallon keskilämpötilan trendi vuodesta 1951 vuoteen 2012 on sopusoinnussa havaintojen kanssa. Lyhyempien, 10–15 vuoden mittaisten jaksojen, trendien simuloiminen on malleille vaikeampaa, esimerkkinä lämpötilan muutos vuodesta 1998 vuoteen 2012.{9.4, tietolaatikko 9.2}
- Ilmaston lämpiäminen oli vuosina 1998–2012 hitaampaa kuin pidemmän jakson 1951–2012 aikana. Tätä on pyritty selittämään sekä säteilypakotteen hitaammalla kasvulla että luonnollisen vaihtelun vaikutuksella. Molempia ilmiöitä pidetään tärkeinä, joskaan asiaa ei tunneta kovin tarkasti. Yksi luonnolliseen vaihteluun liittyvä ilmiö on lämmön entistä voimakkaampi siirtyminen syvemmälle meriin. Säteilypakotteen kasvun hidastumiseen ovat ilmeisesti vaikuttaneet auringon aktiivisuuden viimeaikainen heikkeneminen sekä tulivuorenpurkaukset. Näitten tekijöitten tarkkaa merkitystä ei tosin juurikaan osata arvioida. Huomattava osa havaittujen ja mallien tuottamien viimeaikaisten lämpötilatrendien eroista johtunee luonnollisista vaihteluista; ei ole perusteltua olettaakaan, että satunnainen luonnollinen vaihtelu kulkisi malleissa samassa tahdissa kuin todellisuudessa. Ongelmia aiheuttaa mahdollisesti myös se, että kaikkien pakotetekijöitten muutoksia ei välttämättä tunneta riittävän tarkasti. Lisäksi jotkut mallit saattavat yliarvioida kasvihuonekaasujen lisääntymisen ja muitten pakotetekijöitten yhdessä aiheuttamaa ilmaston lämpiämistä.{9.4; tietolaatikko 9.2; 10.3; tietolaatikko 10.2; 11.3}
- Pienten alueitten lämpötilojen simuloiminen on malleille vaikeampaa kuin suurempien alueitten tai koko maapallon keskilämpötilan. Tässäkin suhteessa mallit ovat kyllä kehittyneet.{9.4, 9.6}
- Myös mallien kyky simuloida erilaisia sään ääri-ilmiöitä on parantunut. Mallien simuloimat hyvin kylmien ja lämpimien päivien sekä öitten esiintymisen maailmanlaajuiset trendit osuvat kohtuullisesti yksiin havaintojen kanssa.{9.5}
- Mallien kyky simuloida sademäärien suuren mittakaavan jakaumaa on sekin parantunut jonkin verran. Pienempien alueitten sademäärien simulointi ei sen sijaan vielä onnistu kummoisesti. Mallien toimivuuden arviointia tässä suhteessa vaikeuttaa myös se, että sademäärille havaintotiedot ovat osin epätarkkoja.{9.4, 9.6}
- Joitakin ilmaston lyhytaikaisia vaihteluita, esimerkiksi monsuunikiertoliikettä ja El Niño -ilmiötä, nykyiset mallit osaavat kuvata aiempia paremmin.{9.5}
- Malleissa on nykyisin mukana entistä enemmän pilvien ja pienhiukkasten fysiikkaan liittyviä ilmiöitä, mutta tällä saralla on vielä paljon työtä tehtävänä.{7.3, 7.6, 9.4, 9.7}
- Pohjoisten merialueitten kesäaikaisen jääpeitteen pinta-ala on pienentynyt 1970-luvun loppupuolelta lähtien. Edistysaskeleista huolimatta edelleenkin ainoastaan noin yksi neljäsosa kaikista ilmastomalleista kykenee simuloimaan tämän jään vähenemisen riittävän voimakkaana (jotkut näistä

malleista tosin liiankin voimakkaana). Useimpien mallikokeitten mukaan myös Eteläisen jäämeren jääpeitteen olisi pitänyt hieman vähentyä viime vuosikymmeninä, siis päin vastoin kuin mitä on havaittu. Tässä suhteessa mallien keskinäiset erot ovat kylläkin suuria.{9.4}

- Monet mallit kykenevät simuloimaan merien 700 metrin paksuisen pintakerroksen lämpövaraston vuosien 1961 ja 2005 välisenä aikana havaitun kasvun: mallitulosten keskiarvo osuu pääosan ajasta havaintoihin perustuvan arvion epävarmuushaarukan puitteisiin.{9.4}
- Joissakin ilmastomalleissa (ns. ilmastojärjestelmämallit) myös hiilen kiertokulku on sisällytetty osaksi mallin ohjelmakoodia. Tällaiset mallit kykenevät simuloimaan hiilidioksidin vaihtoa merien ja ilmakehän välillä: trooppisilla alueilla hiilidioksidia siirtyy meristä ilmakehään, keski- ja korkeilla leveysasteilla taas ilmakehästä meriin. Suurimmassa osassa ilmastojärjestelmämallia 1900-luvun loppupuolen hiilen nielut meriin ja maaperään olivat oikeaa suuruusluokkaa, osuen havaintojen perusteella laskettujen epävarmuusarvioitten sisäpuolelle.{9.4}

D.2 Palauteilmiöt ja ilmaston herkkyys

Havaintoihin ja malleihin perustuvat tutkimukset osoittavat entistä luotettavammin maapallon lämpötilan muutosten, palauteilmiöitten ja lämpötaseen välillä vallitsevan yhteyden. Maapallon jo havaitun ja tulevan lämpenemisen suuruus riippuu ilmastoa muuttavista pakotetekijöistä.{Tietolaatikat 12.2 ja 13.1}

- Ilmakehän vesihöyryn määrän ja eri korkeuksilla ilmakehässä eri nopeudella etenevän lämpenemisen yhdessä synnyttämä palauteilmiö on mitä ilmeisimmin muutosta vahvistava. Näin ollen se voimistaa kasvihuonekaasujen lisääntymisen alulle panemaa lämpenemistä. Pilviin liittyvä palaute lienee niin ikään lämpenemistä vahvistava, kun otetaan huomioon kaikki erityyppiset pilvet. Tämän palauteilmiön suuruutta ei kuitenkaan tunneta kovin hyvin, ja jopa sen vaikutussuuntakin on jossakin määrin epävarma. Näin on ennen kaikkea siksi, että ilmaston lämpenemisen vaikutusta alapilviin ei vielä tunneta riittävän hyvin.{7.2}
- Tasapainotilaa vastaava ilmaston herkkyysluku saadaan määritettyä, kun mallikokeissa ensin kaksinkertaistetaan ilmakehän hiilidioksidipitoisuus teollistumista edeltävään tasoon verrattuna ja tämän jälkeen annetaan ilmastojärjestelmän hakeutua uuteen tasapainotilaan, mihin kuluu aikaa satoja vuosia. Tasapainotilan löydyttyä katsotaan, paljonko maapallon keskilämpötila on noussut verrattuna aikaan ennen hiilidioksidipitoisuuden kohottamista. Tasapainotilaa vastaavan herkkyysluvun arvo on todennäköisimmin 1.5 ja 4.5 asteen välillä ja erittäin todennäköisesti vähintäänkin yksi aste. Toisaalta on varsin epätodennäköistä, että herkkyys olisi suurempi kuin 6°C^{16} . Edelliseen IPCC-raporttiin verrattuna herkkyysluvun epävarmuusvälin alarajaa on alennettu puolella asteella ($2.0^{\circ}\text{C} \rightarrow 1.5^{\circ}\text{C}$), mutta yläraja on pysynyt samana. Arviota on korjattu hivenen mm. pidentyneistä havaintosarjoista saadun tiedon sekä uusien säteilypakotelaskelmien perusteella.{TS TFE.6, kuva 1; tietolaatikko 12.2}
- Ilmastomuutoksen etenemisvauhti ja voimakkuus riippuvat säteilypakotteesta, ilmastojärjestelmän palauteilmiöistä sekä lämmön varastoitumisesta meriin ja muihin ilmastojärjestelmän osiin. Näissä kolmessa suureessa viime vuosikymmeninä havaitut muutokset ovat sopusoinnussa ilmaston herkkyydelle esitettyjen arvioitten kanssa.{Tietolaatikat 12.2 ja 13.1}

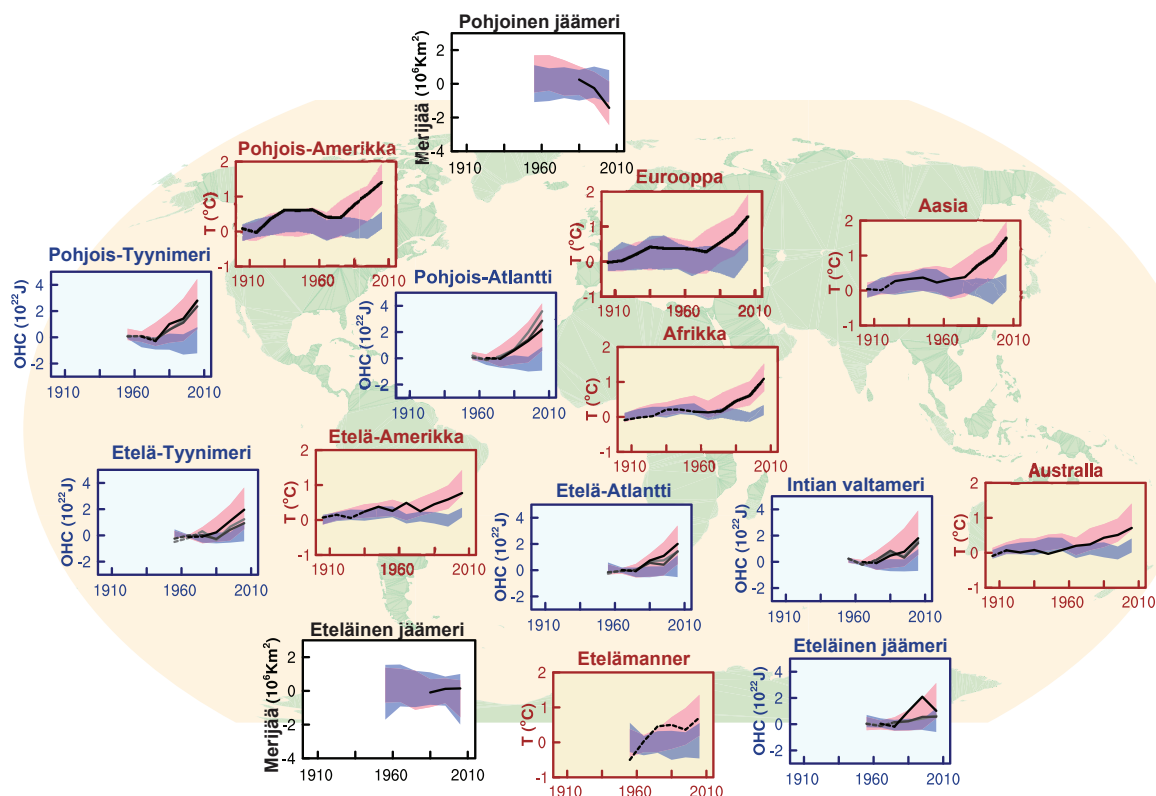
¹⁶Ilmaston herkkyydelle on tässä annettu ainoastaan vaihteluväli eikä lainkaan parasta arvioita, koska eri tutkimusten tulokset poikkeavat selvästi toisistaan.

- Ilmaston herkkyytluku voidaan vaihtoehtoisesti laskea myös ajan mukana voimistuvalla ilmastonmuutospakotteelle. Tämä suure kuvaa, paremmin kuin tasapainotilaa vastaavaa herkkyyttä, miten ilmasto muuttuu lähipien kymmenien ja satojen vuosien aikana. Ajan suhteen muuttuvaa pakotetta vastaava herkkyytluku määritetään käytännössä niin, että ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta lisätään tasaisesti 1 %:lla joka vuosi. Tällaisten mallikokeitten tuloksista katsotaan, kuinka paljon maapallon keskilämpötila on noussut sinä ajankohtana, jona hiilidioksidin määrä ilmakehässä on kaksinkertaistunut. Voimistuvaan pakotteeseen liittyvän herkkyytluvun arvo on todennäköisimmin 1.0–2.5°C ja hyvin suurella varmuudella pienempi kuin 3.0°C. {Tietolaatikko 12.2}
- Ilmastojärjestelmän herkkyyttä voidaan havainnollistaa myös arvioimalla, miten paljon tietynsuuruinen yhteenlaskettu kertynyt hiilidioksidipäästöjen määrä teollistumisen aikakauden alusta tarkasteltavaan ajankohtaan mennessä lämmittäisi maapalloa. Tätä herkkyytlukua kutsutaan päästettyyn hiilidioksidimäärään suhteutetuksi lämpötilan nousuksi (engl. “transient climate response to cumulative carbon emissions”, lyhenne TCRE). Todennäköisimmin TCRE:n arvo on 0.8–2.5°C jokaista biljoonaa hiileksi muutettua hiilidioksiditonnia (1000 GtC) kohti. Tämä arvio pätee siinä ilmastonmuutoksen vaiheessa, jossa lämpötilat ovat nousussa, aina noin 2000 GtC:n päästöihin asti (kuva SPM.10). Aiheeseen palataan kappaleessa E.8. {12.5; tietolaatikko 12.2}
- Eri kasvihuonekaasujen ja muitten pakotetekijöitten tärkeyttä ilmaston muuttajina voidaan vertailla monenlaisten mittalukujen avulla; valinta riippuu siitä, mitä ilmastonmuutoksen piirteitä kulloinkin halutaan painottaa. Ominaislämmitysvaikutus (“global warming potential”; GWP) perustuu yksittäisestä tekijästä aiheutuvan säteilypakotteen voimakkuuteen, ja se lasketaan valitun ajanjakson keskiarvona. Lämpötilanmuutosvaikutus (“global temperature change potential”, lyhenne GTCP) taas ilmaisee, kuinka voimakkaan maapallon keskilämpötilan muutoksen joku tekijä yksinään aiheuttaisi tietyn ajan kuluttua. Näitten suureitten nykyiseen tietämykseen perustuvia arvoja on esitetty varsinaisen raportin puolella. {8.7}

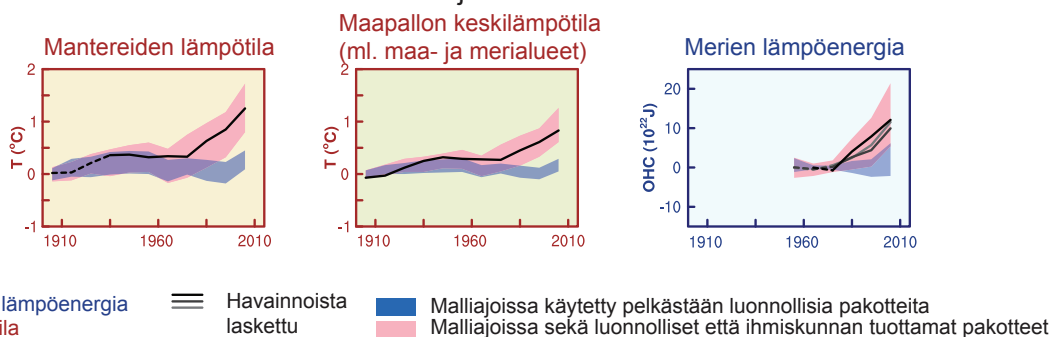
D.3 Mistä jo koettu ilmastonmuutos johtuu?

Ihmiskunnan päästöt ovat jo muuttaneet ilmastoa. Tämä näkyy monin tavoin: ilmakehä ja meret ovat lämmenneet, jään ja lumen määrä on vähentynyt, veden kiertokulussa on havaittavissa muutoksia, merenpinta on noussut ja myös joittenkin sään ääri-ilmiöitten esiintymisessä on todettavissa muutoksia (kuva SPM.6 ja taulukko SPM.1). Ihmiskunnan vaikutuksista ilmastoon on nyt olemassa enemmän näyttöä kuin edellisen IPCC-raportin ilmestyessä. On varsin ilmeistä, että ilmaston lämpiäminen 1900-luvun puolivälin jälkeen johtuu pääosin ihmiskunnan tuottamista päästöistä. {10.3–10.6, 10.9}

- Enemmän kuin puolet vuosien 1951 ja 2010 välisenä aikana mitatusta maapallon keskilämpötilan noususta on aiheutunut ihmisten tuottamista kasvihuonekaasupäästöistä ja muista ilmastoa muuttavista toimista. Ihmiskunnan päästöjen aiheuttamalle lämpötilan nousulle laskettu paras arvio vastaa hyvin tuona ajanjaksona havaittua lämpötilan muutosta. {10.3}
- Vuosina 1951–2010 kasvihuonekaasujen päästöjen lasketaan yksinään nostaneen maapallon keskilämpötilaa 0.5–1.3 asteella. Muitten ihmiskunnan tuottamien pakotteitten yhteenlasketun vaikutuksen (tärkeimpänä pienhiukkasista johtuva jäähdytys) arvioidaan olleen -0.6:n ja +0.1 asteen välissä. Luonnollisten pakotteitten tuottama lämpötilan muutos oli -0.1 ... 0.1°C. Lisäksi maapallon keskilämpötila on heilahdellut satunnaisesti $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ilmaston luonnollisista vaihteluista johtuen. Kun



Maailmanlaajuiset keskiarvot



Kuva SPM.6. Ilmaston tähänastisen havaitun lämpenemisen vertailua mallien tuloksiin kolmen ilmastomuut-tujan perusteella: pintalämpötila eri maanosissa (aikasarjakuvat keltaisella pohjalla), Pohjoisen ja Eteläisen jäämeren jääpeitteen pinta-alat syyskuussa (valkoisella pohjalla) ja ylimpään vesikerrokseen sitoutuneen lämpöenergian määrä eri merialueilla (vaaleansinisellä pohjalla). Kuvan alaosassa on esitetty lämpötilan ja meriveden lämpösisällön muutosten maailmanlaajuiset keskiarvot. Pintalämpötilojen poikkeamat on lasket-tu suhteessa jakson 1880–1919 keskiarvoon; meriveden lämpötiloille vertailujakso on 1960–1980 ja jääpeit-teelle 1979–1999. Havaintoihin perustuvat aikasarjat (mustat käyrät) on esitetty kymmenen vuoden keskiar-voina. Jos epävarmuus on havaintojen puutteellisuuden takia suurta, on käytetty katkoviivaa: esimerkiksi lämpötilan aikasarjoissa silloin, kun havaintotietojen alueellinen kattavuus on alle 50 %. CMIP5-mallien tu-loksista laskettu 5–95 %:n epävarmuusväli on merkitty varjostuksella. Punainen varjostus kuvaa mallikokei-ta, joissa on käytetty pakotteena sekä luonnollisia pakotetekijöitä että ihmisten tuottamia päästöjä. Sinisellä varjostetut nauhat esittävät mallikokeita, joissa on huomioitu vain luonnolliset pakotteet. {Kuva 10.21; kuva TS.12}

kaikki nämä osuudet lasketaan yhteen, päädytään tulokseen, joka on varsin hyvin sopusoinnussa vastaavana aikana havaitun 0.6–0.7 asteen lämpötilan nousun kanssa. { 10.3 }

- Ihmiskunnan tuottamat päästöt todennäköisesti selittävät huomattavan osan eri maanosissa 1900-luvun puolivälin jälkeen havaitusta lämpötilan noususta (kuva SPM.6). Poikkeuksen tästä muodostaa Etelämanner, mistä havaintotietoa on saatavissa liian niukasti luotettavien johtopäätösten tekemiseksi. Sen sijaan nopeasti lämmenneillä pohjoisilla napa-alueilla ihmiskunnan päästöjen vaikutus näyttäisi olleen huomattava. { 2.4, 10.3 }
- Kasvihuonekaasujen lisääntyminen ja stratosfäärin otsonikerroksen ohentuminen ovat yhdessä johtaneet troposfäärin lämpiämiseen ja stratosfäärin alaosien lämpötilojen laskuun 1960-luvun alun jälkeisenä aikana. { 2.4, 9.4, 10.3 }
- Merien 700 metrin paksuisen pintakerroksen lämpötilat ovat keskimäärin nousseet 1970-luvulta lähtien, mikä suurelta osin selittyy ihmiskunnan kasvihuonekaasupäästöillä (kuva SPM.6). Päästöjen vaikutus on nähtävissä myös joittenkin yksittäisten merialueitten lämpötiloissa. { 3.2, 10.4 }
- Ihmiskunnan aiheuttama ilmastonmuutos näyttää myös vaikuttaneen veden kiertokulkuun maapallolla viimeisen puolen vuosisadan aikana: ilmakehän sisältämän vesihöyryn määrä on kasvanut, sademäärien jakautuminen maapallon maa-alueilla on muuttunut, joillakin maa-alueilla rankkasateet ovat voimistuneet ja meriveden suolapitoisuuden alueellinen jakaumakin on muuttunut. { 2.5, 2.6, 3.3, 7.6, 10.3, 10.4 }
- Ilmaston lämpeneminen selittää myös äärimmäisten lämpötilojen esiintymisessä havaittuja muutoksia, koskien sekä äärilämpötilojen yleisyyttä että voimakkuutta. Ihmiskunnan tähänastisten päästöjen vuoksi helleaaltojen esiintymisen todennäköisyys on saattanut joillakin alueilla jopa kaksinkertaistua 1900-luvun puolivälin jälkeen (taulukko SPM.1). { 10.6 }
- Kasvihuonekaasupäästöt ovat osaltaan vaikuttaneet pohjoisten merien jääpeitteen hupenemiseen vuoden 1979 jälkeen. Eteläisellä jäämerellä jäät ovat sen sijaan hieman lisääntyneet. Tämän ilmiön syitä ei kunnolla ymmärretä. Myöskään luonnollisen vaihtelun osuutta ilmiön aiheuttajana ei vielä tunneta riittävän hyvin (kuva SPM.6). { 10.5 }
- Vuoristojen jäätiköt ovat pienentyneet 1960-luvulta alkaen, ja Grönlannin mannerjäätikön massakato on kiihtynyt vuoden 1993 jälkeen. Nämäkin ilmiöt johtuvat todennäköisesti ainakin osaksi kasvihuonekaasupäästöistä. Sen sijaan Etelämantereen jäätikön viimeisten parin vuosikymmenen aikana havaitun massakadon syitä ei vielä ymmärretä kunnolla. { 4.3, 10.5 }
- Pohjoisella pallonpuoliskolla keväisin lumen peitossa oleva alue on pienentynyt 1970-luvun alusta lähtien, ja tähänkin lienevät ihmiskunnan päästöt osaltaan vaikuttaneet. { 10.5 }
- 1970-luvulta lähtien meren pinnan kohoaminen selittyy suurelta osin ihmiskunnan tuottamilla päästöillä — aiheuttaahan ilmastonmuutokseen liittyvä lämpötilojen nousu sekä jäätiköitten sulamista että meriveden lämpölaajenemista. Kuten aiemmin on todettu, juuri nämä ovat kaksi tärkeintä merenpinnan nousua aiheuttavaa tekijää. { 10.4, 10.5, 13.3 }
- Tekokuista käsin mitatut auringonsäteilyn vaihtelut osoittavat, että ainakaan tarkasteltaessa jaksoa 1986–2008 auringon säteilyn määrän muutokset eivät ole voineet lämmittää maapalloa. On kyllä mahdollista, että auringon säteilyn jaksottaiset 11-vuotiset vaihtelut saattavat aiheuttaa ilmaston heilahteluja joillakin alueilla. Sen sijaan kosmisen säteilyn ja pilvisyyden muutosten välille ei ole voitu löytää luotettavaa yhteyttä. { 7.4, 10.3, tietolaatikko 10.2 }

E. Ilmaston maailmanlaajuiset ja alueelliset muutokset tulevaisuudessa

Ilmaston tulevia muutoksia on mahdollista arvioida erityyppisten ilmastomallien avulla. Kehittyneimmisissä malleissa ovat mukana ilmastojärjestelmän kaikki keskeiset osat ja niitten väliset vuorovaikutukset. Näitten rinnalla käytetään myös eri tavoin yksinkertaistettuja malleja. Ilmastomalleja ajettaessa käytetään pakotteena erilaisia vaihtoehtoisia skenaarioita, jotka kuvaavat ihmisten tuottamien kasvihuonekaasujen ja pienhiukkasten pitoisuuksien sekä muitten pakotteitten kehittymistä tulevaisuudessa. Viides IPCC-raportti perustuu ensisijaisesti CMIP5-ilmastomalleihin (CMIP: “Coupled model intercomparison project” eli kytettyjä ilmastomalleja vertaileva tutkimushanke), ja malliajojen pakotteena on käytetty uusia ns. RCP-skenaarioita (RCP tulee sanoista “representative concentration pathway” eli pitoisuuksien kehityskulun skenaario). Kaikissa RCP-skenaarioissa ilmakehän hiilidioksidipitoisuus on vuonna 2100 nykyistä korkeampi (tietolaatikko SPM.1). Ellei toisin ole mainittu, tässä luvussa tarkasteltavat ilmastonmuutosennusteet kuvaavat tilannetta vuosina 2081–2100, ja vertailukohtana on käytetty vuosien 1986–2005 keskimääräistä ilmastoa. Maapallon keskilämpötila oli jo ehtinyt nousta 1800-luvun loppupuolelta tuohon vertailukauteen tultaessa 0.61 [0.55–0.67] asteella. Lämpäminen on jatkunut siitä eteenpäinkin, joten vertailukausi ei enää täsmälleen kuvaa tämänhetkistä ilmastoa (asiaa on käsitelty varsinaisen raportin luvussa 2).

Kasvihuonekaasupäästöjen jatkuessa maapallon ilmasto lämpenee edelleen, ja muutoksia on odotettavissa kaikissa ilmastojärjestelmän osissa. Ilmastonmuutoksen hillitseminen edellyttää päästöjen tuntuva ja pitkäjännitteistä rajoittamista. {6, 11–14}

- Ilmastonmuutosten maantieteellinen jakauma ei riipu merkittävästi siitä, tarkastellaanko heti lähivuosikymmeninä vaiko vasta kauempana tulevaisuudessa odotettavissa olevia muutoksia, joskin lyhyen aikavälin muutokset ovat luonnollisesti vähäisempiä. Erityisesti pieniä alueita ja lähitulevaisuutta tarkasteltaessa on tärkeää ottaa huomioon myös ilmaston luonnollinen vaihtelu. Vuosisadan puoliväliin ja loppupuolelle ennustettujen muutosten voimakkuus taas riippuu ratkaisevasti tarkasteltavasta kasvihuonekaasuskenaariosta (tietolaatikko SPM.1). {11.3, tietolaatikko 11.1, liite I}
- Kun otetaan huomioon malliajoissa käytettyjen kasvihuonekaasuskenaarioiden erilaisuus, tämän raportin ilmastonmuutosennusteet muistuttavat sekä voimakkuudeltaan että maantieteelliseltä jakaumaltaan edellisessä IPCC-raportissa annettuja arvioita. Suuriin kasvihuonekaasupäästöihin pohjautuvissa ennusteissa mallitulosten välinen hajonta on kuitenkin nyt pienempi. Tämä johtuu siitä, että uudet skenaariot perustuvat kasvihuonekaasujen pitoisuuksiin eivätkä päästöjen määriin. Näin ollen hiilen kiertokulkuun liittyvien laskelmien epävarmuus ei enää ole mukana vaikuttamassa ilmastonmuutosennusteitten väliseen hajontaan. Merenpinnan ennustetaan kohoavan enemmän kuin edellisessä arviointiraportissa. Arvioita on voitu päivittää, sillä jäätiköitten mallituksessa on viime vuosina edistytty. {11.3, 12.3, 12.4, 13.4, 13.5}

E.1 Ilmakehän lämpötilat tulevaisuudessa

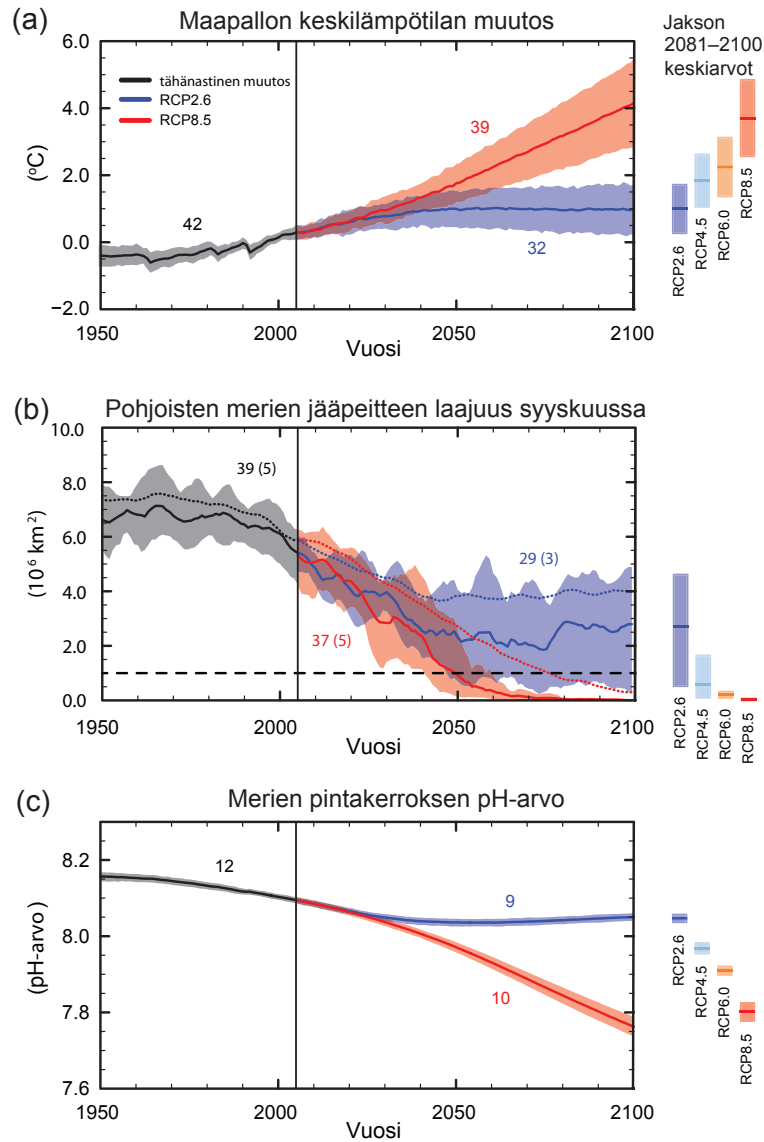
Kaikkien muitten skenaarioitten paitsi RCP2.6:n mukaan maapallon keskilämpötila nousee ennen vuotta 2100 enemmän kuin 1.5 asteella, kun vertailukohtana käytetään 1800-luvun loppupuolen tilannetta. RCP6.0- ja RCP8.5-skenaarioitten mukaan maapallo näyttäisi lämpenevän yli kahdella asteella, ja myös RCP4.5-skenaarion toteutuessa vähintään kahden asteen lämpötilan nousun todennäköisyys suurempi kuin tuon rajan alle jäämisen. Lämpiyminen jatkuu vielä vuoden 2100 jälkeenkin, poikkeuksena RCP2.6-skenaario. Lämpenemisen nopeus toki vaihtelee jatkossakin vuosikymmenestä toiseen, ja jotkut alueet lämpenevät enemmän kuin toiset (kuvat SPM.7 ja SPM.8).{ 11.3, 12.3, 12.4, 14.8 }

- Vuosina 2016–2035 maapallon keskilämpötila on todennäköisesti 0.3–0.7 astetta korkeampi kuin vuosina 1986–2005. Arviota laadittaessa on oletettu, että lähivuosikymmeninä ei esiinny valtaisia tulivuorenpurkauksia tai pitkäkestoisia muutoksia auringon lähettämässä säteilyssä. Jos ennustettuja muutoksia verrataan ilmaston luonnolliseen vaihtelevaisuuteen, muutossignaali on selvimmin nähtävissä trooppisilla ja subtrooppisilla alueilla. { 11.3 }
- Vuosille 2081–2100 ennustettu lämpötilan muutos riippuu tarkasteltavasta kasvihuonekaasuskenaariosta. RCP2.6-skenaarion toteutuessa maapallon keskilämpötila nousisi 0.3–1.7°C, RCP4.5:n mukaan 1.1–2.6°C, RCP6.0:n 1.4–3.1°C ja RCP8.5:n 2.6–4.8°C. Pohjoiset alueet lämpiävät nopeammin kuin maapallo keskimäärin, ja lämpeneminen on yleensä voimakkaampaa maa-alueilla kuin merillä (kuvat SPM.7 ja SPM.8 sekä taulukko SPM.2).{ 12.4, 14.8 }
- Kun vertailukohtana käytetään vuosien 1850–1900 ilmastoa, maapallon keskilämpötila nousee RCP4.5-, RCP6.0- ja RCP8.5-skenaarioitten mukaan todennäköisimmin vähintäänkin 1.5 asteella. Kahden viimeksimainitun skenaarion mukaan lämpötilan nousu todennäköisesti ylittää kahden asteen rajan, ja myös RCP4.5-skenaarion toteutuessa todennäköisyys on suurempi tuon rajan ylittymisen puolesta kuin sitä vastaan. Sen sijaan RCP2.6-skenaarion mukaisilla päästöillä kahden asteen lämpötilan nousu vaikuttaa epätodennäköiseltä. RCP8.5-skenaarion mukaan taas on täysin mahdollista, että maapallo lämpenisi jopa yli neljällä asteella (todennäköisyys yhtä suuri puolesta ja vastaan). Muissa skenaarioissa näin suureen lämpötilan nousuun tuskin päädytään ainakaan vielä tällä vuosisadalla. { 12.4 }
- Ilmastomuutoksen edetessä valtaosalla maapallon manneralueista mitataan hyvin korkeita lämpötiloja entistä useammin ja hyvin kylmiä lukemia vastaavasti harvemmin. Helleaallot yleistyvät ja kestävät yhä kauemmin. Toisaalta talvisin esiintyy vielä aina joskus myös hyvin kylmiä lämpötiloja (taulukko SPM.1){ 12.4 }

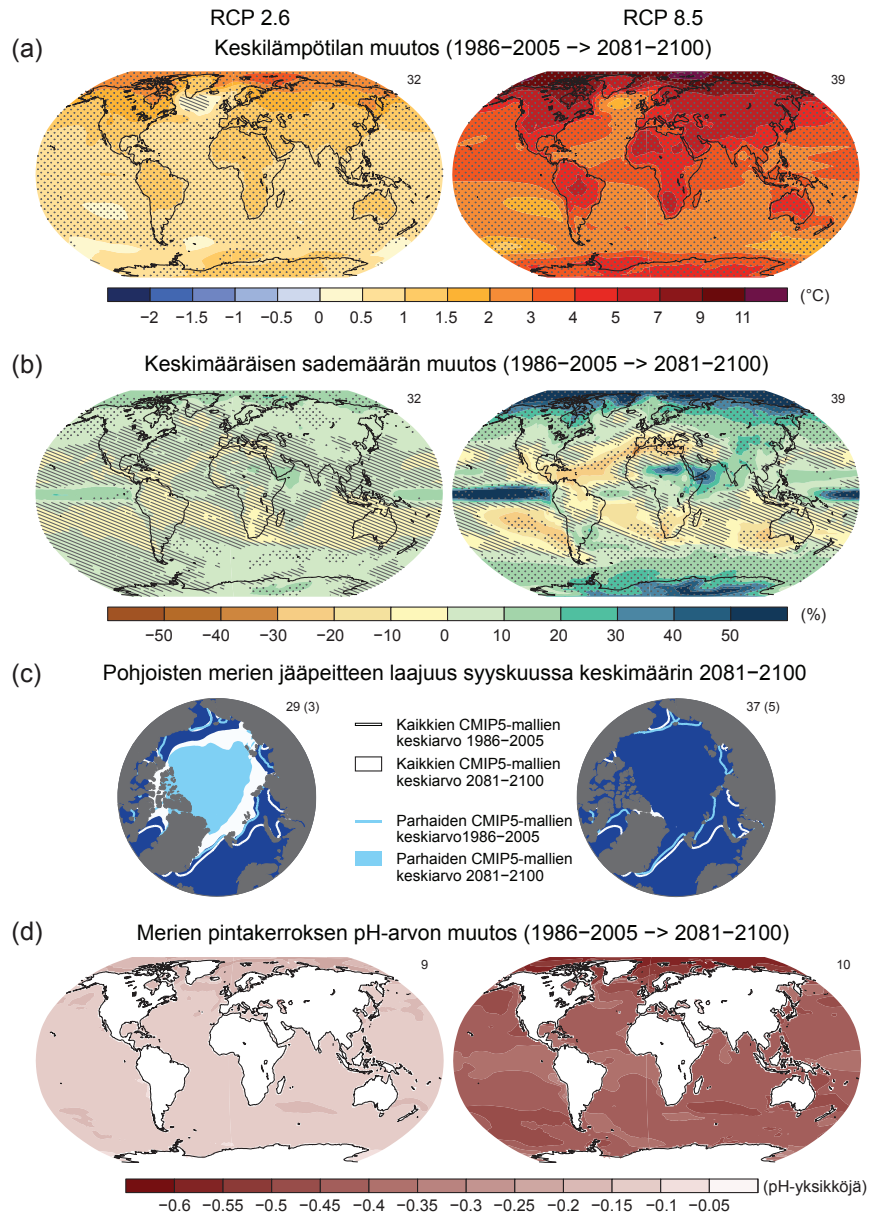
E.2 Veden kiertokulun ennustetut muutokset

Sademäärän ja haihdunnan tulevat muutokset vaihtelevat alueittain. Yleisesti ottaen runsassateisten ja kuivien alueitten väliset erot kasvavat entisestään, samoin sateisen ja kuivan vuodenajan vastakkaisuus. Näin ei kuitenkaan tapahdu kaikkialla (kuva SPM.8).{ 12.4, 14.3 }

- Lähivuosikymmenille ja vuosisadan lopulle ennustetut sademäärän ja erät muutkin veden kiertokulkuun liittyvät muutokset ovat maantieteelliseltä jakaumaltaan samankaltaisia, mutta kauempana



Kuva SPM.7. CMIP5-malleilla simuloituja ilmastonmuutoksen aikasarjoja vuodesta 1950 vuoteen 2100: (a) maapallon keskimääräisen pintalämpötilan muutos verrattuna jakson 1986–2005 keskiarvoon; (b) pohjoisten merialueitten jääpeitteen laajuus syyskuussa (5 vuoden liukuva keskiarvo); (c) veden pH-arvo meren pinnalla. Mallitulosten keskiarvot (käyrät) ja mallienvälisiä eroja kuvastava epävarmuusväli (varjostus) on esitetty molemmille ääriskenaarioille; RCP2.6 sinisellä ja RCP8.5 punaisella. Musta käyrä ja sitä ympäröivä harmaa varjostus kuvaavat tähänastisia simuloituja muutoksia, kun malliajoissa on käytetty havaintoihin pohjautuvia ilmastonmuutospakotteita. Kaikkien neljän skenaarion mukaiset mallitulosten keskiarvot ja epävarmuusvälit vuosille 2081–2100 on esitetty kuvien oikeassa reunassa pystypylväin. Käyrien viereen merkityt numerot kertovat, kuinka monta mallia on ollut käytössä kutakin aikasarjaa laskettaessa. Yhtenäisin viivoin esitetyt jään laajuuden arviot (b)-kuvassa perustuvat vain niihin 3–5 malliin (mallien lukumäärät käyrien yhteydessä suluissa), jotka ovat kyenneet simuloimaan parhaiten vuosina 1979–2012 havaitun jään keskimääräisen pinta-alan ja trendin. Koko laajaan mallijoukkoon perustuva tulos on esitetty pisteviivoilla. Mustan vaakasuoran katkoviivan alapuolella (jääala alle miljoona neliökilometriä) meri on loppukesästä lähestulkoon jäätön. {kuvat 6.28, 12.5 ja 12.28–12.31; kuvat TS.15, TS.17 ja TS.20}



Kuva SPM.8. Mallitulosten keskiarvoina laskettuja ilmastosuureitten muutoksia jaksolle 2081–2100, erikseen RCP2.6- (vasemmalla) ja RCP8.5-skenaariolle (oikealla): (a) vuoden keskilämpötilan muutos (°C); (b) keskimääräisen vuotuisen sademäärän muutos (%); (c) Pohjoisen jäämeren jääpeitteen laajuus syyskuussa ja (d) veden pH-arvon muutos meren pinnalla. Kuvissa (a), (b) ja (d) muutokset on esitetty suhteessa jakson 1986–2005 keskiarvoon. Kuvien oikeaan ylänurkkaan on merkitty laskelman pohjana käytettyjen mallien lukumäärä. Kuvissa (a) ja (b) on merkitty vinoviivituksella ne alueet, missä simuloitu muutos on luonnolliseen vaihteluun verrattuna heikko (pienempi kuin luonnolliseen vaihteluun liittyvä 20-vuotiskeskiajovien keskihajonta). Pisteytyksellä merkityillä alueilla muutossignaali taas on vahva (luonnollisen vaihtelun keskihajontaan nähden vähintään kaksinkertainen, ja lisäksi ainakin 90 % kaikista malleista tuottaa samansuuntaisen muutoksen). Kuvassa (c) mallien vuosille 1986–2005 simuloima jään laajuus on merkitty käyrinä ja vuosisadan lopun jääpeite varjostuksella. Kaikkien mallien tulosten keskiarvoon perustuvat jään laajuudet on merkitty valkoisella värillä. Vaaleansinisellä piirretyt käyrät ja varjostus taas perustuvat niihin 3–5 malliin (lukumäärät kuvien yhteydessä suluissa), jotka kykenevät simuloimaan parhaiten vuosien 1979–2012 havaintojen mukaisen jään keskimääräisen pinta-alan ja muutostrendin. {kuvat 6.28, 12.11 12.22 ja 12.29; kuvat TS.15, TS.16, TS.17 ja TS.20}

tulevaisuudessa muutos on suurempi. Lähitulevaisuudessa koettavat muutokset riippuvat kuitenkin suuresti myös luonnollisesta vaihtelusta, eritoten silloin, kun tarkastellaan pienempiä alueita. Myös pienhiukkasten päästöt voivat vaikuttaa sademääriin.{ 11.3 }

- RCP8.5-skenaarion toteutuessa vuotuiset sademäärät näyttäisivät kasvavan tämän vuosisadan aikana korkeilla leveysasteilla ja trooppisella Tyynellä valtamerellä. Subtrooppisten ja keskileveysasteitten kuivilla alueilla vettä tulisi enimmäkseen nykyistä niukemmin, kun taas monilla runsassasteisilla alueilla olisi odotettavissa enemmän sadetta (kuva SPM.8).{ 7.6, 12.4, 14.3 }
- Voimakkaitten rankkasateitten ennakoidaan pääsääntöisesti voimistuvan ja yleistyvän sekä keski-

Taulukko SPM.2. Maapallon keskilämpötilan ja merenpinnan korkeuden ennustettu muutos tämän vuosisadan puolivälissä (vuosina 2046–2065) ja lopulla (vuosina 2081–2100). Paras arvio tarkoittaa tässä mallitulosten keskiarvoa. Vertailukohtana kumpaisellekin muutokselle toimii jakson 1986–2005 keskiarvo.{12.4; taulukot 12.2 ja 13.5}

(a) Lämpötilan nousu (asteina)

Jakso	2046–2065		2081–2100	
Skenaario	Paras arvio	Epävarmuusväli	Paras arvio	Epävarmuusväli
RCP2.6	1.0	0.4–1.6	1.0	0.3–1.7
RCP4.5	1.4	0.9–2.0	1.8	1.1–2.6
RCP6.0	1.3	0.8–1.8	2.2	1.4–3.1
RCP8.5	2.0	1.4–2.6	3.7	2.6–4.8

(b) Merenpinnan kohoaminen (metreinä)

Jakso	2046–2065		2081–2100	
Skenaario	Paras arvio	Epävarmuusväli	Paras arvio	Epävarmuusväli
RCP2.6	0.24	0.17–0.32	0.40	0.26–0.55
RCP4.5	0.26	0.19–0.33	0.47	0.32–0.63
RCP6.0	0.25	0.18–0.32	0.48	0.33–0.63
RCP8.5	0.30	0.22–0.38	0.63	0.45–0.82

Taulukkoa SPM.2 koskevia huomautuksia:

Lämpötilan nousulle esitetyt arviot perustuvat CMIP5-malleihin. Havaintojen perusteella (HadCRUT4-analyysit) maapallon keskilämpötila oli jo noussut jaksojen 1850–1900 ja 1986–2005 (taulukossa käytetty vertailujakso) välisenä aikana 0.61 [0.55–0.67] °C.{2.4, 11.2; taulukot 12.2 ja 12.3}

Merenpinnan korkeuden muutos on laskettu 21 CMIP5-ilmastomallin tulosten perusteella. Laskelmissa on otettu huomioon myös mannerjäätiköitten virtauksien mahdolliset nopeat muutokset ja ihmisten toimista johtuvat manneralueitten vesivarantojen (sisävesistöt, patoaltaat, pohjavesi, ym.) muutokset; näille on kuitenkin käytetty kaikissa skenaarioissa samoja arvoja. Nykytiedon valossa merenpinnan kohoaminen voisi olla oleellisesti nopeampaa kuin mitä taulukon SPM.2(b) epävarmuusrajat antavat ymmärtää ainoastaan siinä tapauksessa, että riittävän laajat merenpinnan tason alapuolisella alueella sijaitsevat Etelämantereen jäätikön osat valuisivat mereen. Tämäkään ei vielä ennen vuotta 2100 nopeuttaisi merenpinnan kohoamista kuin muutamalla kymmenellä sentillä.

Epävarmuusvälit on laskettu mallituloksiin perustuvan muutoksen todennäköisyysjakauman avulla, niin että kummassakin päässä 5 % todennäköisyysjakaumasta on jätetty haarukan ulkopuolelle. Matemaattisessa mielessä kyseessä on siis 90 %:n todennäköisyysväli, mutta raportissa se on varovaisuuden vuoksi tulkittu 66 %:n todennäköisyysväliksi. Näin on tehty mm. siksi, että eri mallien laatutaso ja tulosten luotettavuus vaihtelevat. Vuosisadan puoliväliä koskevia ennusteita laadittaessa luonnolliseen vaihteluun liittyvä epävarmuus on vielä huomattavaa, samoin muista pakotteista kuin kasvihuonekaasujen lisääntymistä johtuva epävarmuus. Vuosisadan puolivälin ennustuksiin tuo oman epävarmuutensa myös se, että lämpeneminen saattaa jäädä lähivuosikymmeninä (v. 2016–2035) pienemmäksi kuin mitä aiemmin on arvioitu.

leveysasteitten manneralueilla että kostean ilmaston vyöhykkeellä päiväntasaajan lähellä (taulukko SPM.1).{7.6, 12.4}

- Monsuuni-ilmaston piiriin kuuluva alue luultavimmin laajentuu tämän vuosisadan aikana. Vaikka monsuunikiertoliikkeeseen liittyvät tuulet todennäköisesti pikemminkin heikkenevät, monsuunisateet näyttävät silti voimistuvan, koska nykyistä lämpimämmässä ilmakehässä on entistä enemmän vesihöyryä. Sadekausi näyttäisi myös pidentyvän monilla alueilla, mikä johtuu lähinnä siitä, että monsuunisateet loppuvat myöhemmin syksyllä.{14.2}
- Trooppisen Tyynen valtameren El Niño -sääilmiöön liittyvä vuosienvälinen vaihtelu on jatkossakin voimakasta, ja tämän vaihtelun vaikutus ulottuu kauas muillekin alueille maailmassa. Koska ilmakehässä on tulevaisuudessa enemmän kosteutta, El Niñoon liittyvät sademäärien vaihtelut vuodesta toiseen näyttäisivät voimistuvan. Muutoin El Niñon mahdollisesta voimistumisesta tai heikkenemisestä tahi ilmiön maantieteellisen jakauman muuttumisesta on vaikea sanoa mitään varmaa. Osittain tämä johtuu El Niño -ilmiön suuresta luonnollisesta vaihtelevaisuudesta.{5.4, 14.4}

E.3 Ilman laadun muutokset

- Ilman laatuun vaikuttanee tulevaisuudessakin ensisijaisesti erilaisten ilmaa saastuttavien päästöjen määrä, ei niinkään ilmaston muuttuminen. Ilman laadun kuvaajina on tässä yhteydessä käytetty pinnanläheisen ilmakerroksen otsonipitoisuutta ja PM2.5-arvoa¹⁷. Ilmaston lämpeneminen pyrkii itsessään laskemaan alailmakehän otsonin taustapitoisuuksia, ts. otsonipitoisuuksia sellaisilla alueilla, jotka sijaitsevat kaukana päästölähteistä. Mahdollinen ilman korkea metaanipitoisuus, mihin esim. RCP8.5-skenaarion mukaan tulevaisuudessa päädyttäisiin, vaikuttaa kuitenkin päinvastaiseen suuntaan. RCP8.5-skenaarion toteutuessa alailmakehän otsonin taustapitoisuudet olisivat noin 25 % (8 ppb) korkeampia kuin niissä skenaarioissa (esim. RCP4.5 ja RCP6.0), joissa metaanin määrän muutosten on oletettu jäävän pieniksi.{11.3}
- Havaintotietojen ja mallien tulosten perusteella on päätelty, että erittäin saastuneilla alueilla lämpötilan nousu puolestaan lisää kaikkein korkeimpien otsoni- ja pienhiukkaspitoisuuksien esiintymistä. Ilmastomuutos saattaa myös vaikuttaa pienhiukkasten syntyyn luonnossa sekä hiukkasten huuhtoutumiseen pois ilmakehästä sateitten mukana.{11.3}

E.4 Tulevat muutokset merissä

Valtamerien lämpeneminen jatkuu tällä vuosisadalla, ja samalla lämpöä siirtyy pinnalta syvempiin vesikerroksiin. Lämpötilojen nousu vaikuttaa myös merien virtauksiin.{11.3, 12.4}

- Lämpeneminen on voimakkainta meren pintakerroksessa trooppisilla ja pohjoisen pallonpuoliskon subtrooppisilla alueilla. Syvempiä kerroksia tarkasteltaessa eniten taas lämpenee Eteläinen jäämeri. Kun katsotaan mallien keskimäärin ennustamaa lämpötilan muutosta vuoteen 2100 mennessä, merien 100 metrin paksuinen pintakerros lämpenisi RCP2.6-skenaarion mukaan n. 0.6 ja RCP8.5-skenaarion toteutuessa n. 2.0 asteella. Kilometrin syvyydessä lämpötila nousisi vastaavasti 0.3:sta (RCP2.6) 0.6:een asteeseen (RCP8.5).{12.4, 13.3}

¹⁷PM2.5-lukua käytetään ilman pienhiukkaspitoisuuden mittana — se kertoo, kuinka paljon ilmassa leijuu halkaisijaltaan 2.5 mikrometriä pienempiä hiukkasia.

- Atlannin valtameren meridionaalisen kiertoliikkeen, joka siirtää tehokkaasti lämpöä kohti pohjoista, ennustetaan heikkenevän tämän vuosisadan aikana. RCP2.6-skenaarioon perustuvissa malliajoissa heikkeneminen on keskimäärin 11 % ja vaihtelee malleittain 1–24 prosentin välillä¹⁸. Vastaavat arviot RCP8.5-skenaariolle ovat 34 % (mallitulosten keskiarvo) ja 12–54 % (mallitulosten vaihteluväli). Meridionaalinen kiertoliike heikkenee luultavasti jonkin verran jo vuoteen 2050 mennessä. Heikkeneminen ei kuitenkaan etene tasaisesti, ja kiertoliike voi luonnollisen vaihtelun takia jossakin vaiheessa väliaikaisesti voimistuakin. { 11.3, 12.4 }
- Tässä raportissa tarkasteltujen mallikokeitten perusteella näyttää hyvin epätodennäköiseltä, että Atlannin meridionaalinen kiertoliike pysähtyisi kokonaan tai muutoin muuttaisi perusteellisesti luonnettaan tämän vuosisadan aikana. Kiertoliikkeen muutoksista vuoden 2100 jälkeen on vaikea sanoa mitään varmaa. Mikäli ilmaston lämpeneminen kuitenkin edelleen jatkuisi voimakkaana, kiertoliikkeen täydellistä pysähtymistä myöhemmin tulevaisuudessa ei pidetä mahdottomana. { 12.5 }

E.5 Jää- ja lumipeite tulevaisuudessa

Ilmaston lämmitessä pohjoisten merien jääpeitteen pinta-ala pienenee tällä vuosisadalla edelleen ja jäät ohentuvat. Myös pohjoisen pallonpuoliskon keväisin lumen peitossa oleva alue käy pienemmäksi ja jäätiköt kutistuvat. { 12.4, 13.4 }

- Kun tutkitaan mallien keskimäärin ennustamia muutoksia, jättien nähdään vähentyvän Pohjoisella jäämerellä kaikkina vuodenaikoina. Tämän vuosisadan lopulle tultaessa jään pinta-ala pienenee syyskuussa RCP2.6-skenaariion perusteella 43 % ja RCP8.5:n mukaan 94 %. Helmikuussa vähennystä olisi vastaavasti odotettavissa 8:sta (RCP2.6) 34 (RCP8.5) prosenttiin. { 12.4 }
- Kun otetaan tarkasteluun vain ne mallit, jotka pystyvät simuloimaan pohjoisten merien havaittua jään laajuutta ja jääpinta-alan trendiä vuodesta 1979 vuoteen 2012 kaikkein parhaiten, Pohjoinen jäämeri olisi RCP8.5-skenaariion mukaan syyskuussa todennäköisesti jokseenkin jäätön¹⁹ jo ennen vuosisadan puoliväliä (kuvat SPM.7 ja SPM.8). Muille skenaariolle jäätömien kesien alkamisajan kohtaa ei voida luotettavasti arvioida. { 11.3, 12.4, 12.5 }
- Myös Eteläisen jäämeren jäät näyttäisivät ilmaston lämmitessä vähenevän vuosisadan loppupuolella, mutta tämä ennuste on varsin epävarma. { 12.4 }
- Vuoristojen jäätiköitten tilavuuden ennakoidaan pienentyvän ennen vuosisadan loppua RCP2.6-skenaariion mukaan 15–55% ja RCP8.5-skenaariion mukaan 35–85 %. Näissä luvuissa eivät ole mukana Etelämantereen mannerjäätiköistä erillään olevat vuoristojäätiköt. { 13.4, 13.5 }
- Kun tarkastellaan mallien keskimäärin antamia tuloksia, kevätkuukausien lumipeitteen pinta-ala pohjoisella pallonpuoliskolla pienentyisi ennen vuosisadan loppua RCP2.6-skenaariion mukaan 7 % ja RCP8.5-skenaariion mukaan 25 %. { 12.4 }

¹⁸Tässä esitetään poikkeuksellisesti pienintä ja suurinta muutosta ennustavien mallien tulosten keskinäinen vaihteluväli eikä mallituloksiin sovitettuun todennäköisyysjakaumaan perustuvaa epävarmuushaarukkaa.

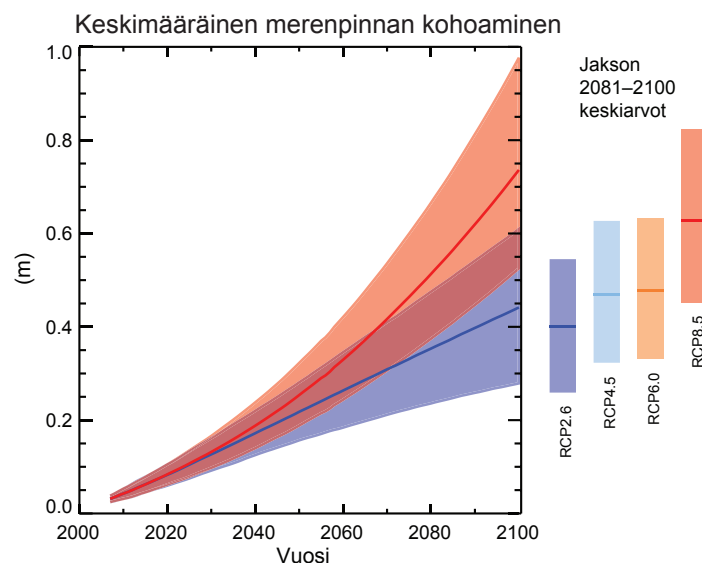
¹⁹Pohjoisen jäämeren tulkitaan olevan 'jokseenkin jäätön', kun jään pinta-ala on pienempi kuin miljoona neliökilometriä vähintään viitenä peräkkäisenä kesänä.

- Ilmaston lämpeneminen supistaa myös lähelle maan pintaa ulottuvan ikiroudan aluetta. Mallitulojen keskiarvon mukaan pinnanläheisen ikiroudan (pinnalta 3.5 metrin syvyyteen) pinta-ala pienentyisi tällä vuosisadalla RCP2.6-skenaarion mukaan 37 % ja RCP8.5-skenaarion mukaan 81 %.{12.4}

E.6 Merenpinnan korkeuden ennustetut muutokset

Merien pinnan nousu jatkuu tällä vuosisadalla (kuva SPM.9). Kaikkien neljän RCP-skenaarion mukaan pinnan kohoaminen on tulevaisuudessa nopeampaa kuin mitä on havaittu vuosien 1971 ja 2010 välisenä aikana. Tämä johtuu sekä meriveden kiihtyvistä lämpenemisestä että jäätikköjen entistä nopeammasta sulamisesta.{13.3–13.5}

- Merenpinnan kohoamista katsotaan nyt osittavan ennustaa luotettavammin kuin edellisen IPCC-raportin julkaisemisen aikaan. Pinnan kohoamista aiheuttavia ilmiöitä ymmärretään paremmin, mallien tulokset vastaavat paremmin havaintoja, ja suurten mannerjäätikköjen dynamiikan muutosten vaikutuksiakin on opittu ottamaan huomioon.{13.3–13.5}
- Kun tarkastellaan muutosta jaksosta 1986–2005 jaksoon 2081–2100, keskimääräisen maailmanlaajuisen merenpinnan korkeuden ennakoitaan nousevan eri kasvihuonekaasuskenaarioitten mukaan seuraavasti: RCP2.6: 26–55 cm, RCP4.5: 32–63 cm, RCP6.0: 33–63 cm, RCP8.5: 45–82 cm.



Kuva SPM.9. Mallilaskelmiin perustuva ennustettu merenpinnan kohoaminen (maailmanlaajuinen keskiarvo) tämän vuosisadan aikana verrattuna jakson 1986–2005 keskimääräiseen korkeuteen. Pinnan korkeuden muutos koko ajanjaksolle on esitetty erikseen RCP8.5- (punaisella) ja RCP2.6-skenaariolle (sinisellä). Paras arvio on merkitty käyrinä ja arvion epävarmuusväli varjostuksen avulla. Kuvan oikean reunan pystypylväät esittävät jakson 2081–2100 keskiarvon kaikille neljälle RCP-skenaariolle: poikkiviiva pylvään keskellä kertoo parhaan arvion ja pylvään pituus epävarmuushaarukan leveyden.{Taulukko 13.5; kuvat 13.10 ja 13.11; kuvat TS.21 ja TS.22}

RCP8.5-skenaarion toteutuessa merenpinnan arvioidaan lainehtivan vuonna 2100 jo 52–98 cm perusjakson tasoa korkeammalla, ja vuosina 2081–2100 pinta nousisi keskimäärin 8–16 mm vuodessa. Näitä ennustuksia laadittaessa on mallitulosten ohella otettu huomioon kirjallisuudessa esitetyjä arvioita vuoristo- ja mannerjäätiköistä vapautuvan veden määristä (kuva SPM.9 ja taulukko SPM.2).{13.5}

- RCP-skenaarioihin perustuvien mallilaskelmien mukaan meriveden lämpölaajeneminen selittää vuoteen 2100 mennessä ennustetusta keskimääräisestä maailmanlaajuisesta merenpinnan kohoamisesta noin puolet eli 30–55 %. Vuoristojäätikköjen sulaessa vapautuva vesi aiheuttaisi noususta 15–35 %. Myös Grönlannin mannerjäätikön sulaminen kiihtyy nopeammin kuin mitä jäätikölle satavat lumisateet lisääntyvät, joten sieltäkin saadaan lisää vettä meriin. Sen sijaan Etelämantereella jäätä sulaa pinnalta käsin vain hyvin vähän tulevaisuudessakin. Kun lumisateet samalla lisääntyvät, tämän maailman suurimman mannerjäätikön pinnan jäätaseen muutokset pyrkivät luultavasti osaltaan hidastamaan merenpinnan kohoamista. Grönlannin ja Etelämantereen jäätiköitten jäävirtojen kiihtyminen ja siitä aiheutuva jäävuorien lisääntyvä lohkeaminen sen sijaan näyttäisi tuottavan meriin lisää vettä, ja tämän ilmiön arvioidaan kohottavan merenpintaa ennen vuosisadan loppua 3–20 cm.{13.3–13.5}
- Nykyisen käsityksen mukaan ainoa ilmiö, joka saattaisi johtaa edellä esitettyjä arvioita selvästi voimakkaampaan merenpinnan kohoamiseen, on huomattavan suurten Etelämantereen jäätikön osien mahdollinen valahtaminen mereen; vaara koskee alueita, joilla jäätikön pohja sijaitsee merenpinnan tason alapuolella. Mikäli näin kävisi, siitä koituisi vuoteen 2100 mennessä merenpinnan korkeuteen enintään muutama kymmenen senttiä lisää.{13.4, 13.5}
- Raportissa on myös tarkasteltu mahdollisuutta, että meren pinta kohoaisi tämän vuosisadan aikana enemmän kuin mihin edellä esitetyissä arvioissa on päädytty. Jotkut osaksi kokeellisiin kaavoihin perustuvat mallit ovatkin tarjonneet jopa kaksi kertaa niin suurta merenpinnan kohoamista kuin puhtaasti fysiikan yhtälöihin pohjautuvat mallit. Tiedeyhteisön sisällä on kuitenkin kovin vaihtelevia käsityksiä siitä, kuinka luotettavina tällaisia puolikokeellisia malleja voidaan pitää.{13.5}
- Meren pinta ei kohoaa joka puolella maailmaa yhtä paljon. Kuitenkin veden pinnan ennustetaan olevan vuonna 2100 nykyistä korkeammalla lähes kaikkialla (yli 95 %:lla merien pinta-alasta). Noin 70 % mantereitten rannikkoalueista saa kokea meren pinnan kohoavan suunnilleen yhtä paljon kuin maapallolla keskimäärin (poikkeama enintään ± 20 % maailmanlaajuisesta keskiarvosta).{13.1, 13.6}

E.7 Hiilen kiertokulun muutokset

Ilmastonmuutos vaikuttaa myös hiilen kiertokulkuun maapallolla, mikä vielä osaltaan nopeuttaa hiilidioksidin määrän kasvua ilmakehässä. Osa ilmakehään päästetystä hiilidioksidista liukenee meriin, mikä johtaa meriveden muuttumiseen happamemmaksi.{6.4}

- Kaikkien neljän kasvihuonekaasuskenaarion mukaan osa hiilidioksidin päästöistä liukenee jatkosakin meriin. Määrällisesti eniten hiilidioksidia päätyy meriin runsaitten päästöjen skenaarioissa. Yhtä lailla varmaa sen sijaan ei ole, toimivatko myös maa-alueitten kasvipeite ja maaperä hiilidioksidin nieluna edelleen tulevaisuudessakin. Valtaosa malleista ennakoivat kyllä näin käyvän, mutta

Taulukko SPM.3. Kutakin RCP-skenaariota vastaavat yhteenlasketut kertyneet hiilidioksidipäästöt jakson 2012–2100 aikana. Ilmastojärjestelmämallien tulosten perusteella on laskettu, kuinka paljon hiilidioksidia ilmakehään voitaisiin päästää, jotta sen pitoisuus ilmakehässä kehittyisi tarkasteltavan skenaarion mukaisesti. Yksikkönä on käytetty miljardia tonnia eli gigatonnia: 1 Gt = 10¹⁵ g. Päästöjen yhteenlaskettu määrä on annettu ensin hiilen massaksi muunnettuna (GtC) ja sitten hiilidioksidin kokonaismassana (GtCO₂). 1 GtC vastaa 3.667 GtCO₂:a.{6.4; taulukko 6.12; kuva TS.19}

Skenaario	GtC		GtCO ₂	
	Paras arvio	Epävarmuusväli	Paras arvio	Epävarmuusväli
RCP2.6	270	140 – 410	990	510 – 1505
RCP4.5	780	595 – 1005	2860	2180 – 3690
RCP6.0	1060	840 – 1250	3885	3080 – 4585
RCP8.5	1685	1415 – 1910	6180	5185 – 7005

muutamien mallien mukaan maa-alueet saattaisivat jopa muuttua hiilidioksidin lähteiksi. Tämä aiheutuisi osaksi ilmaston muuttumisesta, osaksi muutoksista maan käytössä.{6.4}

- Tutkittaessa hiilinieluja, ts. hiilen sitoutumista meriin, kasvipeitteeseen ja maaperään, ilmastoa simuloidaan ilmastojärjestelmämallien avulla; tällaisissa malleissa on mukana hiilen simuloitu kiertokulku merien, ilmakehän ja maa-alueitten välillä. Näillä malleilla tehtyjen kokeitten perusteella hiilen kiertokulun muutokset toimivat ilmaston lämmitessä muutosta vahvistavana palauteilmiönä. Hiilidioksidin pitoisuuden kasvu ilmakehässä kyllä itsessään voimistaa hiilen sitoutumista meriin ja manneralueille, mutta ilmaston muuttuminen puolestaan heikentää näitä hiilen nieluja. Toisin sanoen ilmastomuutos huomioon ottaen meret ja maa-alueet kykenevät sitomaan pienemmän osan tuotetusta hiilidioksidista kuin jos ilmasto säilyisi nykyisenkaltaisena. Vastaavasti suurempi osuus hiilidioksidipäästöistä jää ilmakehään. Vastaavanlainen vahvistava palauteilmiö on todettu tutkittaessa maapallolla varhaisempina aikoina esiintyneitä luonnollista tekijöistä johtuneita ilmastovaihteluita.{6.2, 6.4}
- Kaikkien kasvihuonekaasuskenaarioitten mukaan meriveden happamoituminen jatkuu. RCP2.6-skenaarion toteutuessa meren pintakerroksen pH-arvon ennakoitaan putoavan vuoteen 2100 mennessä 0.06–0.07 yksiköllä. Muitten skenaarioitten mukaan pH laskisi vastaavasti 0.14–0.15 (RCP4.5), 0.20–0.21 (RCP6.0) tai 0.30–0.32 (RCP8.5) yksikköä (kuvat SPM.7 ja SPM.8).{6.4}
- Taulukossa SPM.3 on annettu arvio sellaisista vuosien 2012–2100 aikana kertyvistä yhteenlasketuista hiilidioksidipäästöjen määristä²⁰, jotka johtaisivat kutakin RCP-skenaariota vastaavaan ilmakehän CO₂-pitoisuuden kasvuun vuoteen 2100 mennessä. Luvut on saatu 15 ilmastojärjestelmämallin tulosten perusteella. RCP2.6-skenaarion mukaan päästöjä saisi kertyä 140–410 GtC (GtC = hiilen massaksi muunnettuja miljardeja tonneja), RCP4.5:n 595–1005 GtC, RCP6.0:n 840–1250 GtC ja RCP8.5-skenaarion toteutuessa 1415–1910 GtC.{6.4}
- Mikäli haluttaisiin päästä RCP2.6-skenaarion mukaiselle kehitysuralle, maailmanlaajuisten hiilidioksidipäästöjen pitäisi pudota vuoteen 2050 mennessä 14–96 % vuoden 1990 tasoon verrattuna. Vuonna 2100 hiilidioksidin päästöjen pitäisi olla jo hyvin pieniä; noin puolet tarkastelluista malleista on jopa sillä kannalla, että hiilidioksidia pitäisi tuolloin poistaa ilmakehästä enemmän kuin mitä sinne päästetään.{6.4, kuva TS.19}

²⁰Mukaan on laskettu fossiilista polttoaineista, sementin tuotannosta, teollisuudesta ja jätteitten käsittelystä peräisin olevat päästöt.

- Sulavan ikeroudan alueilta arvioidaan vuoteen 2100 mennessä vapautuvan ilmakehään 50–250 GtC hiiltä — osaksi hiilidioksidin ja osaksi metaanin muodossa. Tämä arvio, joka perustuu RCP8.5-skenaarioon, on kuitenkin sangen epävarma. {6.4}

E.8 Ilmastonmuutoksen pysäyttäminen ja kasvihuonekaasujen päästöistä aiheutuvat pitkäkestoiset muutokset

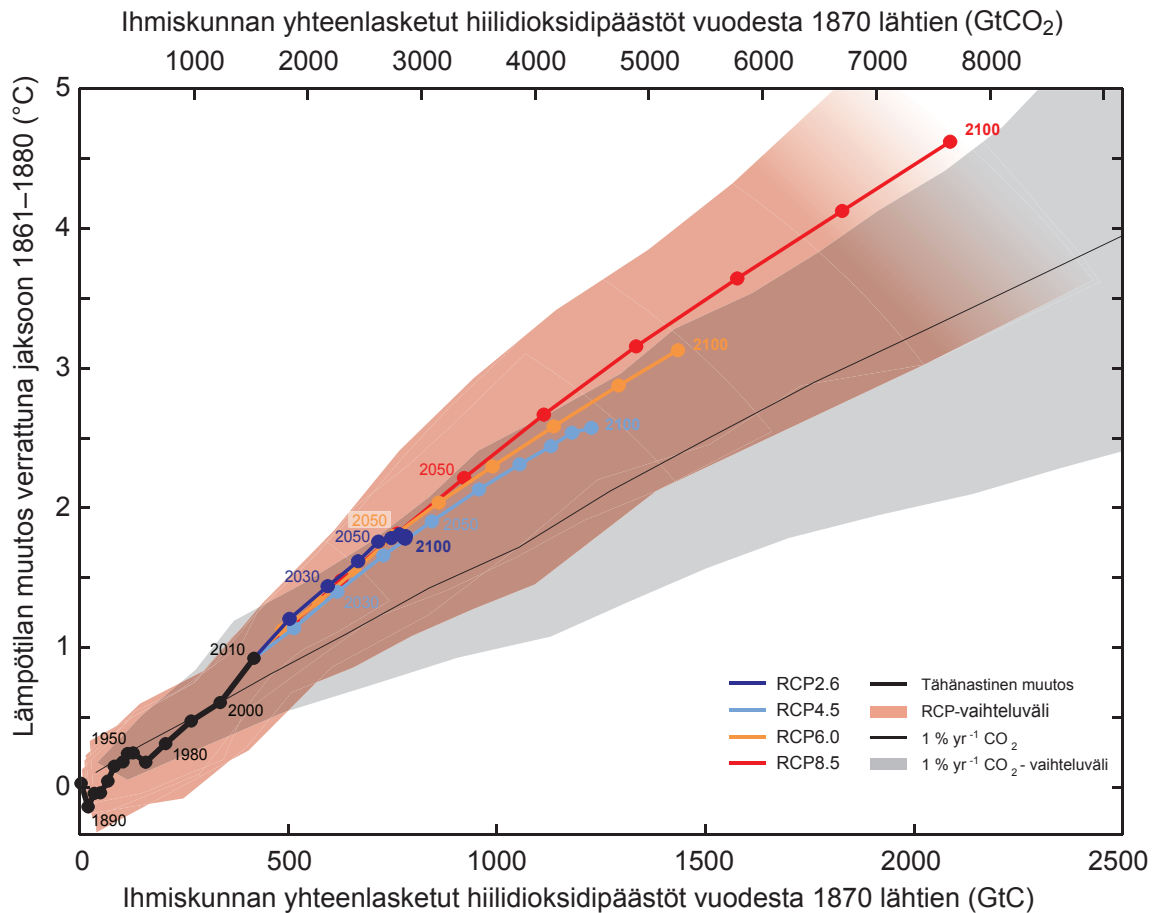
Tämän vuosisadan aikana ja myöhemmin tulevaisuudessa koettava maapallon keskilämpötilan nousu riippuu hyvin pitkälti siitä, kuinka paljon ilmakehään päästetään hiilidioksidia yhteensä aikojen kuluessa (kuva SPM.10). Vaikka hiilidioksidin päästöt saataisiin joskus tyyten loppumaan, ilmasto ei silti palautuisi entiselleen lähelle teollistumista edeltävää tilaa vielä satoihin vuosiin. Näin ollen ihmiskunnan tähänastiset ja tulevat hiilidioksidipäästöt määräävät maapallon ilmaston kehityksen sadoiksi vuosiksi eteenpäin. {12.5}

- Maapallon keskilämpötilan nousu riippuu lähes suoraviivaisesti tarkasteltavaan ajankohtaan mennessä kertyneistä yhteenlasketuista hiilidioksidipäästöistä (kuva SPM.10)²¹. Jos hiilidioksidia esimerkiksi päästetään ilmakehään lähitulevaisuudessa runsaasti, pitää päästörajoituksia vastaavasti tiukentaa sitäkin ankarammin myöhemmin tulevaisuudessa. {12.5}
- Jos halutaan, että pelkistä hiilidioksidipäästöistä aiheutuva maapallon keskilämpötilan nousu suhteessa jakson 1861–1880²² keskilämpötilaan jäisi alle kahteen asteeseen 50 %:n todennäköisyydellä, ei ilmakehään saisi päästää hiilidioksidia aikojen kuluessa yhteensä enempää kuin 1210 GtC (miljardia tonnia hiilen massana; hiilidioksidin massana vastaa 4440 GtCO₂:a). Jos halutaan pysyä alle kahden asteen lämpenemisen isommalla eli 66 %:n todennäköisyydellä, päästöjä saisi kertyä enintään 1000 GtC (3760 GtCO₂); jos tyydytään 33 %:n todennäköisyyteen, vastaava yhteenlaskettu päästömäärä olisi 1570 GtC (5760 GtCO₂)²³. Ikävä kyllä nämäkin arviot ovat turhan toiveikkaita, sillä niitä laadittaessa ei ole otettu huomioon muitten kasvihuonekaasujen päästöjä. Jos kaikki muut ilmastoa muuttavat pakotteet paitsi hiilidioksidipäästöt esimerkiksi kehittyisivät RCP2.6-skenaarion mukaan, saisi hiilidioksidia päästää ilmakehään yhteensä ainoastaan 900 GtC eli 3300 GtCO₂ (33 %:n todennäköisyys 2°C lämpiämisen alitukselle), 820 GtC eli 3010 GtCO₂ (50 %:n todennäköisyys) tai 790 GtC eli 2900 GtCO₂ (66 %:n todennäköisyys). Näistäkin 'päästökiihtymistä' on jo iso osa käytetty, sillä vuoteen 2011 mennessä ilmakehään oli jo päästetty 515 [445–585] GtC (1890 [1630–2150] GtCO₂) hiilidioksidia. {12.5}
- Mitä alhaisemmaksi maapallon keskilämpötilan nousu halutaan rajoittaa, sitä vähemmän hiilidioksidia ilmakehään on yhteensä aikojen saatossa lupa päästää. Samaten jos todennäköisyyttä ajautua jonkin ennalta-asetetun lämpenemisen raja-arvon yläpuolelle halutaan pienentää, on yhteenlaskettuja hiilidioksidipäästöjä vastaavasti pienennettävä. Sallittavia hiilidioksidin päästömääriä on vieläkin pienennettävä, kun otetaan huomioon muitten kasvihuonekaasujen päästöt, hiukkaspäästöjen todennäköinen aleneminen tulevaisuudessa sekä sulavan ikeroudan alueilta ilmakehään vapautuva metaani ja hiilidioksidi (kuva SPM.10). {12.5}

²¹Laskettaessa lämpötilan nousun ja hiilidioksidipäästöjen määrän suhdeluvulle numeroarvoa on lisäksi otettava huomioon muutkin ilmastoa muuttavat pakotteet kuin pelkät hiilidioksidipäästöt.

²²Ensimmäinen mallisimulointien kattama ehyt 20-vuotisjakso.

²³Nämä arviot perustuvat kappaleessa D.2 tarkasteltuun maapallon lämpenemisen riippuvuuteen kertyneistä hiilidioksidipäästöistä tilanteesta, jossa hiilidioksidin pitoisuus kasvaa ajan mukana (suureen lyhenne TCRE).



Kuva SPM.10. Maapallon keskilämpötilan nousun riippuvuus aikojen kuluessa kertyneistä yhteenlasketuista hiilidioksidipäästöistä. Värilliset käyrät esittävät eri RCP-skenaarioitten mukaisia mallituloksiin perustuvia arvioita ja käyrillä olevat pisteet tilannetta eri vuosikymmeninä (esim. '2050' viittaa kymmenvuotisjaksoon 2040–2049). Punainen varjostus kuvaa RCP-skenaarioihin perustuvista malliajoista saadun arvion epävarmuushaarukkaa; varjostuksen haitaloituminen kuvan oikeassa yläreunassa havainnollistaa, miten mallikokeitten pieni lukumäärä hankaloittaa epävarmuuden arvioimista kaukana tulevaisuudessa. Paksu musta käyrä esittää tähänastisia hiilidioksidin päästöjä ja niitten perusteella simuloituja maapallon keskilämpötilan muutoksia. Ohut musta käyrä ja sitä ympäröivä vaaleanharmaa varjostus perustuvat sellaisiin mallikokeisiin, joissa ilmakehän CO₂-pitoisuutta on kasvatettu tasaisesti 1 %:lla vuodessa; tällaisissa mallikokeissa ilmasto lämpenee ilmakehään päästetyn hiilidioksidin määrään suhteutettuna vähemmän kuin RCP-skenaarioajoissa, sillä jälkimmäisissä on otettu huomioon muutkin pakotetekijät kuin pelkkä hiilidioksidin lisääntyminen (esim. metaanin määrän kasvu). Kuvan pystyakselilla on esitetty maapallon keskilämpötilan muutokset suhteessa jakson 1861–1880 keskilämpötilaan. Vaaka-akseli taas kuvaa ihmiskunnan tuottamien hiilidioksidipäästöjen kokonaismäärää vuodesta 1870 tarkasteltavaan ajankohtaan mennessä (alareunan asteikko hiilen ja yläreunan hiilidioksidin massana). Kuva on hieman vaikeaselkoinen, joten siksi suomentajalta pieni havaintoesimerkki tulkinnan avuksi: RCP8.5-skenaarion toteutuessa hiilidioksidin päästöjä kertyisi vuodesta 1870 vuoteen 2100 yhteensä hiukan yli 2000 GtC. Vastaavasti tähän skenaarioon perustuvien mallikokeitten keskiarvona saatavan ennustuksen mukaan maapallon keskilämpötila olisi noussut vuoteen 2100 tultaessa n. 4.6°C. Tätä tilannetta kuvaa punaisen käyrän viimeinen piste oikealla ylhäällä. {kuva 12.45; TS TFE.8, kuva 1}

- Ellei hiilidioksidia ruveta poistamaan ilmakehästä keinotekoisesti, ihmiskunnan tuottamien hiilidioksidipäästöjen aiheuttamasta ilmastomuutoksesta iso osa jää vaikuttamaan satoja ja jopa tuhansia vuosia. Tarkasteltavasta skenaariosta riippuen on arvioitu, että ihmiskunnan tuottamasta ylimääräisestä hiilidioksidista vielä 15–40 % on jäljellä ilmakehässä tuhannen vuoden kuluttua. Vaikka hiilidioksidin päästöt saataisiin joskus kokonaan lopetettua, lämpötilat pysyisivät sen jälkeenkin korkeina satoja vuosia. Merien lämpötilan nousu taas jopa jatkuisi monta sataa vuotta vielä tuostakin eteenpäin, koska lämmön siirtyminen meren syvyyksiin on erittäin hidasta. {Tietolaatikko 6.1; 12.4, 12.5}
- Merenpinnan kohoaminen ei missään tapauksessa lopu vuoteen 2100. Pelkästään meriveden lämpölaajenemisesta johtuva osuus huomioon ottaen pinnan kohoaminen jatkuisi satoja vuosia. Jos ilmakehän hiilidioksidipitoisuus saataisiin pysytettyä alle 500 ppm:ssä, kuten käy esimerkiksi RCP2.6-skenaariossa, meren pinta kohoaisi teollistumista edeltävästä ajasta vuoteen 2300 alle metrin. Jos taas CO₂-pitoisuus kohoaisi 700 ja 1500 ppm:n välille, mihin päädyttäisiin RCP8.5-skenaarion toteutuessa, merenpinnan kohoaminen ylttäisi yhdestä reiluun kolmeen metriin. Arviot ovat melko epävarmoja mm. siksi, että noin kauaksi tulevaisuuteen ulottuvia mallilaskelmia on tehty aika vähän. {13.5}
- Kun lisäksi otetaan huomioon mannerjäätiköistä vapautuva vesi, meren pinta kohoaisi vielä edellä esitettyjä arvioita enemmän. Osa tästä pinnan kohoamisesta saattaa olla palautumatonta, vaikka ilmasto joskus saataisiin jäähtymään takaisin teollistumista edeltäviin lämpötiloihin; jäätiköt eivät siis ilmeisesti palautuisi enää takaisin entiseen kokoonsa. Jos lämpötilat nousevat riittävän paljon ja pysyvät korkeina pitkään, Grönlannin mannerjäätikkö sulaisi lopulta lähes kokonaan, mikä nostaisi merien pintaa maapallolla keskimäärin 7 m. Jäätikön täydellinen sulaminen vie kyllä aikaa luultavimmin yli tuhat vuotta. Grönlannin jäätikön sulattamiseen saattaisi riittää, jos maapallon keskilämpötila nousisi runsaalla yhdellä asteella teollistumista edeltävään aikaan verrattuna; lämpötilan noustessa neljällä asteella vaara olisi jo erittäin suuri. Etelämantereella on laajoja jääalueita, joitten pohja sijaitsee meren pinnan alapuolella. Tällaiset jäätikön osat voivat olla epävakaita, jolloin ne saattavat ilmaston lämmetessä hajota nopeastikin. Nykyisen tietämyksen perusteella ei osata vielä arvioida, kuinka suuri jäätiköitten luhistumisen vaara on. {5.8, 13.4, 13.5}
- Ilmastomuutosta on esitetty torjuttavan myös ns. ilmastomuokkausteknologian avulla, eli puuttamalla tarkoituksellisesti maapallon ilmastojärjestelmään. Tämä onnistuisi esimerkiksi vähentämällä auringonsäteilyn energian imeytymistä maapallolle (vaikkapa tuottamalla stratosfääriin auringonsäteilyä heijastavia pieniä rikkihappopisaroita) tai poistamalla ilmakehästä hiilidioksidia keinotekoisesti. Tällaisten menetelmien käyttökelpoisuuden arvioimiseksi ei ole vielä riittävästi tietoa. Ei osata sanoa, kuinka suuri osa ilmakehään kertyneistä hiilidioksidin päästöistä mahdollisesti voitaisiin saada pois sitomalla hiilidioksidia biologisesti tai kemiallisesti. Auringon säteilyn imeytymistä vähentämällä lämpenemistä voitaisiin mallitulosten perusteella hillitä periaatteessa merkittävästikin, mutta samalla puututtaisiin myös veden kiertokulkuun maapallolla. Auringonsäteilyn lämmityksen vähentäminen ei sitä paitsi lainkaan helpottaisi meriveden happamoitumisongelmaa. Jos auringonsäteilyn imeytymistä rajoittavat toimet jouduttaisiin syystä tai toisesta joskus lopettamaan, niiden vaikutus lakkaisi nopeasti. Piankin maapallon lämpötila olisi taas sillä nousu-uralla, joka määräytyy kasvihuonekaasujen lisääntymisestä. Ilmaston keinotekoisella muokkaamisella pelätään olevan monenlaisia pitkäkestoisia sivuvaikutuksia. {6.5, 7.7}

Tietolaatikko SPM.1: RCP-kasvihuonekaasuskenaariot

Ilmastomuutosennusteita laadittaessa tarvitaan syöttötietona arvio kasvihuonekaasujen ja pienhiukkasten tulevista päästöistä tai pitoisuuksista sekä muista ilmastoa muuttavista pakotetekijöistä. Tulevista päästöistä ei tietystikään ole vielä mitään varmaa tietoa, mutta niille voidaan muodostaa skenaarioita mm. tekemällä oletuksia ihmiskunnan toiminnasta tulevaisuudessa. Tässä osaraportissa ei kuitenkaan paneuduta tähän aihepiiriin vaan lähdetään suoraan liikkeelle kasvihuonekaasujen ja pienhiukkasten pitoisuuksien skenaarioista. Kasvihuonekaasuskenaariot ottavat huomioon ainoastaan ihmiskunnan tuottamat päästöt eivätkä mahdollisia muutoksia luonnollisissa pakotteissa (tullivuorenpurkaukset, auringon säteilyn pitkäaikaiset muutokset, metaanin ja dityppioksidin päästöt luonnosta jne.).

IPCC:n viidennen arviointiraportin laatimisen yhteydessä tutkijat ovat määritelleet neljä uutta kasvihuonekaasuskenaariota, joista käytetään nimitystä 'representative concentration pathways' eli 'pitoisuuksien kehityskulun skenaariot' — lyhyemmin sanottuna RCP-skenaariot. Skenaarioitten nimitykset perustuvat kutakin skenaariota vastaavaan säteilypakotteen voimakkuuteen vuonna 2100 (vertailukohtana v. 1750): RCP2.6-skenaarion mukainen säteilypakote on tuolloin noin 2.6 W/m^2 , RCP4.5-skenaarion 4.5 W/m^2 , RCP6.0:n 6.0 W/m^2 ja RCP8.5:n 8.5 W/m^2 . Yksittäisiä CMIP5-ilmastomalleja tarkasteltaessa nämä lukuarvot on kylläkin tulkittava vain suuntaa-antaviksi, sillä säteilypakotteelle saatava tarkka arvo vaihtelee mallista toiseen. Tämä johtuu mm. hiukkasten ja lyhytikäisten kasvihuonekaasujen erilaisesta käsittelystä eri malleissa. RCP2.6-skenaarion mukaiseen kehitykseen yltäminen edellyttäisi päästöjen hyvin jyrkkää leikkaamista. Myös RCP4.5-skenaario johtaisi pitkällä aikavälillä ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuuksien vakiintumiseen, kylläkin selvästi nykyistä korkeammalle tasolle. RCP8.5-skenaariossa taas oletetaan, että päästöt ovat tulevaisuudessa hyvin suuria. RCP-skenaariot poikkeavat siis toisistaan varsin paljon ja haarukoivat täten varsin kattavasti erilaisia tämän vuosidan ilmastopolitiikan vaihtoehtoja. RCP6.0- ja RCP8.5-skenaarioissa säteilypakote voimistuisi vielä vuoden 2100 jälkeenkin. RCP2.6-skenaarion mukaan pakote taas olisi suurimmillaan jo ennen tämän vuosisadan puoliväliä ja kääntyisi sen jälkeen hitaaseen laskuun. RCP4.5-skenaariossa pakotteen voimistuminen hidastuu vuosisadan lopulla ja loppuu kokonaan vuoteen 2100 mennessä.

Jokaista kasvihuonekaasuskenaariota varten on muodostettu laskelma kasvihuonekaasujen päästöjen ja pitoisuuksien vuosittaisesta kehittymisestä vuoteen 2100 asti. Lisäksi on määritelty maankäytön muutosten ja erilaisten saaste-päästöjen alueelliset jakaumat. RCP-skenaariota laadittaessa on hyödynnetty erilaisia yhteiskunnan toimintaa, ilmakehän kemiaa ja hiilen kiertokulkua kuvaavia malleja sekä lisäksi yksinkertaistettuja ilmastomalleja. Vaikka eri RCP-skenaariot kuvaavatkin hyvin erilaisia päästöjen ja säteilypakotteen tulevia kehityskulkuja, kirjallisuudessa on toki esitetty vieläkin enemmän toisistaan poikkeavia kehitysarvioita; erityisesti tämä koskee pienhiukkasten päästöjä.

Useimmissa ilmastomalliajoissa ilmakehän hiilidioksidipitoisuudet on annettu ulkoisena pakotteena. Eri skenaarioita vastaavat CO_2 -pitoisuudet vuonna 2100 ovat: 421 ppm (RCP2.6), 538 ppm (RCP4.5), 670 ppm (RCP6.0) tai 936 ppm (RCP8.5). Kun otetaan huomioon myös kunkin skenaarion mukainen metaanin ja dityppioksidin pitoisuuksien kasvu, kasvihuonekaasujen yhteenlaskettu vaikutus vastaisi 475 ppm (RCP2.6), 630 ppm (RCP4.5), 800 ppm (RCP6.0) tai 1313 ppm (RCP8.5) ekvivalentti-hiilidioksidipitoisuutta. Ns. ilmastojärjestelmämalleissa on mukana myös mallitettu hiilen kiertokulku, ja näitä malleja on ajettu myös käyttäen pakotteena RCP8.5-skenaarion mukaisia hiilidioksidin päästöjä. Laskelmia on tehty myös sellaisilla malleilla, joissa on mukana ilmakehän kemiaa kuvaava osio. Tällöin pakotteena on käytetty paitsi hiilidioksidin myös kemiallisesti reaktiivisten kaasujen (CH_4 , N_2O , HFC-kaasut, typen oksidit, hääkäkaasu ja erilaiset haihtuvat orgaaniset yhdisteet) päästöjä. Tällaisia malliajoja tarkastelemalla voidaan arvioida, millaista epävarmuutta ilmastoennusteisiin aiheutuu hiilen kiertokulkuun ja ilmakehän kemiaan liittyvistä palauteilmiöistä.