



VALTIONEUVOSTON KANSLIA



## Epälineaariset ja äärimmäiset ilmaston muutokset

Selvitys Vanhasen II hallituksen  
tulevaisuusselontekoa varten



# Epälineaariset ja äärimmäiset ilmaston muutokset

Selvitys Vanhasen II hallituksen  
tulevaisuusselontekoa varten

Valtioneuvoston kanslian julkaisusarja | 14/2008



**Julkaisija**  
**VALTIONEUVOSTON KANSLIA**

**KUVAILULEHTI**  
**25.8.2008**

**Tekijät**

Natalia Pimenoff, Ari Venäläinen, Karoliina Pilli-Sihvola, Heikki Tuomenvirta, Heikki Järvinen ja Kimmo Ruosteenoja, Ilmatieteen laitos; Jari Haapala, Merentutkimuslaitos sekä Jouni Räisänen, Helsingin yliopisto

**Julkaisun laji**

Ilmasto- ja energiapolitiittisen tulevaisuusselonteon taustajulkaisu

**Toimeksiantaja**

Valtioneuvoston kanslia

**Diaarinumero**

Dnro 169/23/2008

**Julkaisun nimi**

Epälineaariset ja äärimmäiset ilmaston muutokset

**Tiivistelmä**

Raportissa esitellään kirjallisuuteen perustuen mahdollisia äärimmäisiä ilmaston muutoksia ja niitä käynnistäviä ilmaston lämpenemisen kynnysarvoja.

Nykytietämyksen mukaan Pohjoisen jäämeren jääpeite voi jo lähivuosisikymmeninä kadota kesäisin ilmaston lämpenemisen ja sitä voimistavien palautteilmäiden vaikutuksesta. Grönlannin mannerjäätikön täydellinen sulaminen on arvioitu mahdolliseksi, jos maapallon keskilämpötila kohoaa 1–2 astetta nykyisestä - ja Länsi-Antarktiksien, jos maapallon keskilämpötila kohoaa 3–5 astetta nykyisestä.

Asiantuntija-arvioiden mukaan maapallon keskilämpötilan 3 asteen kohoaminen nykyisestä voisi johtaa Amazonin sademetsän sekä boreaalisten metsien laaja-alaiseen katoamiseen 50 vuoden sisällä.

Pohjois-Atlantin termohaliinisen kiertoliikkeen odotetaan kuluvan vuosisadan aikana heikenevän, mutta sen pysähtymistä pidetään epätodennäköisenä. Heikkeneminen hidastaa ilmaston lämpenemistä Pohjois-Atlantin alueella, muttei pysäytä sitä. Ilmaston lämpeneminen uhkaa sulattaa merkittäviä määriä pinnan läheisestä ikiroudasta jo kuluva vuosisadan aikana.

Ilmaston lämpenemiseen liittyy äärimmäisten ilmastonmuutosten mahdollisuus. Vaikka näiden äärimmäisten muutosten todennäköisyys on pieni, pitää ne huomioida niiden aiheuttamien suurten vaikutusten johdosta. Äärimmäisten ilmastonmuutosten riski kasvaa sitä suuremmaksi mitä enemmän maapallon lämpötila kohoaa, joten ilmaston lämpenemisen rajoittaminen mahdollisimman pieneksi on perusteltua myös tästä syystä.

**Avainsanat**

tulevaisuusselonteko, ilmastonmuutos, epälineaariset ilmaston muutokset, äärimmäiset ilmaston muutokset

**Julkaisusarjan nimi ja numero**

Valtioneuvoston kanslian julkaisusarja  
14/2008

**ISSN**

0782-6028

**ISBN (painettu)**

978-952-5631-79-1

**Kokonaissivumäärä**

61

**Kieli**

Suomi

**Luottamuksellisuus**

Julkinen

**ISBN (PDF)**

978-952-5631-80-7

**Kustantaja**

Valtioneuvoston kanslia  
Julkaisu PDF:nä: [www.vnk.fi/julkaisut](http://www.vnk.fi/julkaisut)  
Lisätietoja: [julkaisut@vnk.fi](mailto:julkaisut@vnk.fi)

**Taitto**

Valtioneuvoston kanslia/PAY

**Julkaisun välitys**

Yliopistopaino, Helsinki  
[www.yliopistopaino.fi/kirjamyynti](http://www.yliopistopaino.fi/kirjamyynti)  
Tilaukset: [books@yliopistopaino.fi](mailto:books@yliopistopaino.fi)

**Painopaikka**

Yliopistopaino, Helsinki, 2008

|   |                        |  |  |
|---|------------------------|--|--|
| <b>Utgivare</b><br>STATSRÅDETS KANSLI   |                        | <b>PRESENTATIONSBLAD</b><br>25.8.2008  |  |
| <b>Författare</b><br>Natalia Pimenoff, Ari Venäläinen, Karoliina Pilli-Sihvola, Heikki Tuomenvirta, Heikki Järvinen och Kimmo Ruosteenoja, Meteorologiska institutet; Jari Haapala, Havsforskningsinstitutet och Jouni Räisänen, Helsingfors universitet  |                        | <b>Typ av publikation</b><br>Bakgrundspublikation till framtidsredogörelsen om energi- och klimatpolitiken |  |
|   |                        | <b>Uppdragsgivare</b><br>Statsrådets kansli  |  |
|   |                        | <b>Diarienummer</b><br>Dnr 169/23/2008   |  |
| <b>Publikationens namn</b><br>Icke-linjära och extrema klimatförändringar   |                        |  |  |
| <b>Referat</b><br>I rapporten presenteras på basis av litteraturstudier ett antal tänkbara extrema klimatförändringar och träskelvärden för klimatuppvärmningen som kan sätta igång dem.<br><br>Enligt dagens kunskap kan Norra ishavets istäcke redan inom de närmaste årtiondena försvinna sommartid på grund av klimatuppvärmningen och de återkopplingsmekanismer som stärker den. Man har bedömt det möjligt att inlandsisen på Grönland smälter helt om jordens medeltemperatur stiger 1–2 grader och det samma gäller västra Antarktis om jordens medeltemperatur stiger 3–5 grader.<br><br>Enligt experters bedömning kan en tre graders höjning av jordens medeltemperatur leda till att Amazonas regnskog och den boreala skogen till stor del försvinner inom 50 år.<br><br>Den termohalina cirkulationen i Nordatlanten förväntas bli svagare under detta århundrade, men det anses osannolikt att den skulle stanna av. En svagare cirkulation gör klimatuppvärmningen långsammare inom det Nordatlantiska området, men stoppar den inte. Klimatuppvärmningen hotar att smälta en betydande del av permafrosten nära havsytan redan under detta århundrade.<br><br>Klimatuppvärmningen är förenad med en risk för extrema klimatförändringar. Även om sannolikheten för att dessa extrema förändringar ska ske är liten, bör de beaktas med tanke på de stora konsekvenser de skulle ha. Risken för extrema klimatförändringar ökar ju mera jordens temperatur stiger och därför är det även av denna anledning skäl att begränsa klimatuppvärmningen så mycket som möjligt. |                        |  |  |
| <b>Nyckelord</b><br>framtidsredogörelsen, klimatförändringen, icke-linjära klimatförändringar, extrema klimatförändringar   |                        |  |  |
| <b>Publikationsseriens namn och nummer</b><br>Statsrådets kanslis publikationsserie 14/2008   |                        | <b>ISSN</b><br>0782-6028   | <b>ISBN (tryck)</b><br>978-952-5631-79-1 |
| <b>Sidantal</b><br>61   | <b>Språk</b><br>Finska | <b>Sekretessgrad</b><br>Offentlig  | <b>ISBN (PDF)</b><br>978-952-5631-80-7   |
| <b>Förläggare</b><br>Statsrådets kansli<br>Publikationen som PDF: <a href="http://www.vnk.fi/julkaisut">www.vnk.fi/julkaisut</a><br>Ytterligare information: <a href="mailto:julkaisut@vnk.fi">julkaisut@vnk.fi</a>   |                        | <b>Layout</b><br>Statsrådets kansli/enheten för politikanalys  |  |
| <b>Distribution och försäljning</b><br>Universitetstryckeriet, Helsingfors<br><a href="http://www.yliopistopaino.fi/kirjamyynti">www.yliopistopaino.fi/kirjamyynti</a><br>Beställningar: <a href="mailto:books@yliopistopaino.fi">books@yliopistopaino.fi</a>   |                        | <b>Tryckort</b><br>Universitetstryckeriet, Helsingfors, 2008   |  |

# Sisällys

|   |    |
|---|----|
| ESIPUHE .....   | 7  |
| TIIVISTELMÄ.....  | 8  |
| 1 JOHDANTO .....  | 10 |
| 2 TAUSTAA.....  | 11 |
| 2.1 Luonnolliset ilmastonvaihtelut ja -muutokset.....                   | 11 |
| 2.2 Kasvihuoneilmion voimistuminen .....                                | 12 |
| 2.3 Palauteilmiöt .....   | 14 |
| 2.4 Kasvihuonekaasujen päästöskenaariot.....                            | 17 |
| 2.5 Ilmastonmuutosmallit.....   | 18 |
| 2.6 Arvioiden luotettavuudesta .....                                    | 19 |
| 3 EPÄLINEAARISTEN JA ÄÄRIMMÄISTEN ILMASTON MUUTOSTEN MAHDOLLISUUS ..... | 22 |
| 3.1 Lineaarinen ja epälineaarinen ilmaston muutos .....                 | 22 |
| 3.2 Pohjoisen jäämeren jääpeitteen sulaminen .....                      | 25 |
| 3.3 Muutoksia mannerjäätiköissä .....                                   | 27 |
| 3.3.1 Grönlannin mannerjäätikkö .....                                   | 28 |
| 3.3.2 Länsi-Antarktiksensa mannerjäätikkö .....                         | 29 |
| 3.4 Pohjois-Atlantin termohaliinisen kiertoliikkeen heikentyminen ..... | 30 |
| 3.5 Maaekosysteemin muutokset .....                                     | 33 |
| 3.5.1 Amazonin sademetsä.....   | 34 |
| 3.5.2 Havumetsävyöhykkeen metsät .....                                  | 34 |
| 3.6 Ikiroudan sulaminen .....   | 35 |
| 3.7 El Niño -ilmiöissä tapahtuvat muutokset.....                        | 36 |
| 3.8 Muutokset Etelä-Aasian kesämonsuunissa .....                        | 36 |
| 3.9 Sahara/Sahel ja Länsi-Afrikan monsuuni.....                         | 37 |
| 3.10 Merenpohjan metaaniklatraatit .....                                | 37 |
| 4 MUUTOKSIEN VAIKUTUKSET LUONTOON JA YHTEISKUNTIIN .....                | 39 |
| 4.1 Pohjoisen jäämeren jääpeitteen sulaminen .....                      | 39 |
| 4.2 Ikiroudan tilavuuden pieneneminen .....                             | 40 |
| 4.3 Boreaalisten metsien väheneminen .....                              | 40 |
| 4.4 Mannerjäätikön sulaminen .....                                      | 41 |
| 4.5 Kuivuus .....   | 42 |
| 5 JATKOTUTKIMUSTARPEET .....  | 43 |
| 6 YHTEENVETO.....   | 45 |
| 7 KIRJALLISUUSVIITTEET .....  | 49 |
| Liite 1: Säteilypakotetta aiheuttavat tekijät.....                      | 52 |
| Liite 2: IPCC:n käyttämät SRES-päästöskenaariot.....                    | 53 |
| Liite 3: Maapallon keskilämpötilan muutos eri skenaarioissa .....       | 54 |
| Liite 4: Taulukot TS3 ja TS4 .....                                      | 55 |





## ESIPUHE

Ilmastonmuutoksen vaikutuksia koskevissa tutkimuksissa on tähän asti tarkasteltu pääsääntöisesti lämpenemistä, jonka oletetaan etenevän vähitellen ja yllätyksittä. Valtaosa vaikutustutkimuksista on myös keskittynyt Hallitustenvälisen ilmastopaneelin IPCC:n esittämän lämpenemishaarukan keskivaiheille.

Ilmastonmuutos voi kuitenkin olla ennakoitua rajumpaa tai se voi edetä nykyksittään, kynnyksarvojen kautta. Lämpeneminen voi käynnistää palauteilmiöitä, jotka edelleen kiihdyttävät lämpenemistä. Alueellisesti tai globaalisti voi tapahtua epälineaarisia ja äärimmäisiä ilmaston muutoksia.

Englanniksi tällaisia ilmiöitä kutsutaan toisinaan low probability, high impact -tapauksiksi. Nykytiedon valossa useimpien todennäköisyys on pieni, mutta toteutuessaan niiden haitat ihmisille ja ympäristölle voisivat olla hyvin merkittäviä. Mitä alhaisemmalle tasolle lämpeneminen saadaan rajoitettua, sitä pienemmäksi jää riski epälineaaristen ja äärimmäisten ilmaston muutosten laukeamisesta. Lämpenemisen rajoittamista enintään kahteen asteeseen tarkastellaan toisessa valtioneuvoston kanslian tilaamassa selvityksessä.

Tämä Ilmatieteen laitoksen, Merentutkimuslaitoksen ja Helsingin yliopiston selvitys tarkastelee epälineaaristen ja äärimmäisten ilmaston muutosten mahdollisuuksia ja vaikutuksia. Selvityksen tuloksia hyödynnetään soveltuvin osin ilmasto- ja energia-politiittisen tulevaisuusselonteon valmistelussa. Selonteko linjaa ilmasto- ja energia-politiikkaa vuosisadan puoliväliin asti ja yli, kattaa ilmastonmuutoksen torjunnan lisäksi sen vaikutuksiin sopeutumisen sekä tarkastelee Suomen lisäksi globaalia toimintaympäristöä.

Uskomme, että selvityksestä on apua ilmastonmuutoksen riskien arvioimisessa ja niiden minimoimisessa. Kiitämme tutkimuslaitosten yhteenliittymää haastavan ja vielä vähän tutkitun aiheen avaamisesta.

Elokuussa 2008

Oras Tynkkynen  
ilmastopoliittinen asiantuntija  
valtioneuvoston kanslia

## TIIVISTELMÄ

On mahdollista, että ihmisten aiheuttamasta kasvihuoneilmiön voimistumisesta johdettu ilmaston lämpeneminen käynnistää suuria, ns. äärimmäisiä ilmaston muutoksia kuten Pohjoisen jäämeren jääpeitteen häviämisen tai Grönlannin mannerjäätikön sulamisen. Tässä raportissa esitellään kirjallisuuteen perustuen mahdollisia äärimmäisiä ilmaston muutoksia ja niitä käynnistäviä ilmaston lämpenemisen kynnysarvoja.

Nykytietämyksen mukaan Pohjoisen jäämeren jääpeite voi jo lähivuosikymmeninä kadota kesäisin ilmaston lämpenemisen ja sitä voimistavien palauteilmiöiden vaikutuksesta. Jään sulaminen avaa uusia merireittejä, mutta huonontaa jäätä riippuvaisten ihmisten ja eläinten elämänlaatua. Taloudellisen toimeliaisuuden kasvaminen lisäksi pohjoisten alueiden ympäristöriskejä, energiankäyttöä ja siten mitä ilmeisimmin myös kasvihuonekaasujen päästöjä.

Grönlannin mannerjäätikön täydellinen sulaminen on arvioitu mahdolliseksi, jos maapallon keskilämpötila kohoaa 1–2 astetta nykyisestä, ja Länsi-Antarktiksensa, jos maapallon keskilämpötila kohoaa 3–5 astetta nykyisestä. Arviot sulamisen kestoajasta vaihtelevat paljon ja alarajaksi on esitetty 300 vuotta edellä mainittujen lämpenemisrajojen saavuttamisen jälkeen. Grönlannin jäätikön sulaminen nostaisi merenpintaa 7 metriä ja Länsi-Antarktiksensa 5 metriä. Tämänsuuruisilla merenpinnan kohoamisilla olisi erittäin vakavia vaikutuksia.

Asiantuntija-arvioiden mukaan maapallon keskilämpötilan 3 asteen kohoaminen nykyisestä voisi johtaa Amazonin sademetsän sekä boreaalisten metsien laaja-alaiseen katoamiseen 50 vuoden sisällä. Metsien katoaminen aiheuttaisi eliölajien monimuotoisuuden menetyksiä, vaikuttaisi maiden bruttokansantuotteeseen ja vaikeuttaisi etenkin Amazonin alueen yhdyskuntien makean veden saantia.

Lämpimät merivirrat siirtävät lämpöä tropiikista korkeille leveysasteille. Suomen kannalta tärkeä meressä tapahtuva lämmönsiirtomekanismi on Pohjois-Atlantin termohaliininen<sup>1</sup> pohjois-eteläsuuntainen kiertoliike, jonka odotetaan kuluvan vuosisadan aikana heikkenevän, mutta sen pysähtymistä pidetään epätodennäköisenä. Heikkeneminen hidastaa ilmaston lämpenemistä Pohjois-Atlantin alueella, muttei pysäytä sitä.

---

<sup>1</sup> Pohjois-Atlantin kiertoliike koostuu tuulien synnyttämistä pintavirtauksista kuten Golfvirta ja meriveden tiheyserojen aiheuttamista virtauksista. Tiheyserojen aiheuttamaa virtauskenttää kutsutaan myös termohaliiniseksi kiertoliikkeeksi.

Ilmaston lämpeneminen uhkaa sulattaa merkittäviä määriä pinnan läheisestä ikeroudasta jo kuluvan vuosisadan aikana. Ikeroudan sulaminen heikentää maaperän kantavuutta ja vaikeuttaa arktisten alueiden luonnonvarojen etsintää ja hyödyntämistä. Ikeroudan sulaminen nopeuttaa ikeroudassa aikaisemmin jäätyneenä olleen orgaanisen aineen hajoamista ja vapauttaa ilmakehään suuria määriä kasvihuonekaasuja, mikä edelleen voimistaa kasvihuoneilmiötä.

Ilmaston lämpenemiseen liittyy äärimmäisten ilmaston muutosten mahdollisuus. Vaikka näiden äärimmäisten muutosten todennäköisyys on pieni, pitää ne huomioida niiden aiheuttamien suurten vaikutusten johdosta. Äärimmäisten ilmaston muutosten riski kasvaa sitä suuremmaksi, mitä enemmän maapallon lämpötila kohoaa, joten ilmaston lämpenemisen rajoittaminen mahdollisimman pieneksi on perusteltua myös tästä syystä.

# 1 JOHDANTO

Ehkä suurin *ilmastonmuutokseer*<sup>2</sup> liittyvä riski on mahdollisuus, että ilmaston nykyinen tasapainotila, johon ihmiskunta ja luonnonjärjestelmät ovat sopeutuneet, järkkyy. Ihmisten aiheuttama maailmanlaajuinen lämpeneminen käynnistää ilmaston lämpenemistä voimistavia tai heikentäviä palauteilmiötä, jotka voivat johtaa äärimmäisiin *ilmaston muutoksiin*<sup>2</sup>, kuten esimerkiksi Pohjoisen jäämeren jääpeitteen sulamiseen tai valtamerien kiertoliikkeen nopeaan muutokseen.

Äärimmäisillä ilmaston muutoksilla olisi suuri vaikutus niin ihmiskuntaan kuin ympäristöönkin. Ilmastonmuutoksen vaikutuksia tarkasteltaessa keskitytään usein helpommin mallitettaviin asteittäisiin muutoksiin ja vaikeasti ennakoitavat äkilliset muutokset jäävät vähemmälle huomiolle. Kuitenkin pienen esiintymistodennäköisyyden mutta suurten vaikutusten omaavien ilmiöiden tarkastelu on perusteltua niihin liittyvien suurten riskien vuoksi.

Tässä raportissa esitellään ilmastonmuutoksesta mahdollisesti seuraavia äärimmäisiä ilmaston muutoksia ja niille arvioituja kynnsarvoja sekä vaikutuksia saatavilla olevan tutkimustiedon perusteella. Lisäksi arvioidaan tärkeimpiä jatkotutkimustarpeita.

Raportin luvussa 2 on taustatietoa luonnollisesta ilmaston muutoksesta, ihmisten aiheuttamasta ilmastonmuutoksesta ja siitä seuraavista palauteilmiöistä. Raportin luvussa 3 käsitellään ihmisten aiheuttamasta ilmastonmuutoksesta mahdollisesti seuraavia epälineaarisia ja äärimmäisiä ilmaston muutoksia ja niiden kynnsarvoja siinä määrin kuin niitä on mahdollista arvioida. Luku 4 sisältää karkean arvion mahdollisten epälineaaristen ja äärimmäisten ilmaston muutosten vaikutuksista yhteiskuntiin, eliölajeihin ja eliöyhteisöihin. Luvussa 5 tunnistetaan tärkeimpiä jatkotutkimustarpeita, ja luvussa 6 on yhteenveto.

---

<sup>2</sup> Tässä raportissa *ilmastonmuutos* yhteen kirjoitettuna tarkoittaa ihmisen aiheuttamaa maailmanlaajuisen ilmaston muutosta. Erikseen kirjoitettuna *ilmaston muutos* taas tarkoittaa ilmaston muutoksia yleensä.

## 2 TAUSTAA

Maapallon ilmastojärjestelmän muodostavat ilmakehä, hydrosfääri, maa-alueet, biosfääri sekä lumen ja jään muodostaman kryosfääri. Ilmastojärjestelmän osat ovat joko suoraan tai epäsuorasti kytköksissä toisiinsa, ja muutos yhdessä osassa vaikuttaa myös muihin osiin.

### 2.1 Luonnolliset ilmastonvaihtelut ja -muutokset

Maapallon ilmasto on kautta aikojen ollut jatkuvassa muutostilassa. Hitaimmat ilmastonvaihtelut ovat kestäneet satoja miljoonia vuosia ja nopeimmat ovat tapahtuneet muutamissa vuosikymmenissä. Nykykäsityksen mukaan eripituisten ilmastonvaihteluitten syyt ja mekanismit ovat erilaisia.

Tärkeänä osatekijänä maapallon noin 4,5 miljardin vuoden aikana tapahtuneissa luonnollisissa ilmastonvaihteluissa on maapallon pinnanmuotojen jatkuva muuttuminen ja sen vaikutukset ilmakehän koostumukseen sekä maa-meri-jakaumaan. Satojen vuosimiljoonien välein sattuneisiin viileisiin jääkausiaikoihin perimmäisenä syynä näyttäisivät olevan mannerlaattojen liikkeet ja niistä seuraavat muutokset merivirroissa. Kun maapallon jommallakummalla navalla on mannerta, napa-alue jäähtyy talvisin kerryttäen lunta ja jäätä. Jos jää ei ehdi sulaa kesän aikana, syntyy jäätiköitä. Syntyneet jäätiköt voimistavat edelleen viilenemistä heijastaessaan auringonsäteilyä takaisin avaruuteen. Maapallon napojen ollessa meren peittämät ei jääkautta kehity helposti.

Maapallon kiertoradan ja akselikallistuman vaihtelut vaikuttavat merkittävästi maanpinnalle tulevan auringonsäteilyn vuodenaikais- ja leveyspiirijakaumaan. Kiertoradan ja akselikallistuman vaihtelujen uskotaan aiheuttavan jääkausiaikojen 10–100 tuhannen vuoden pituiset lämpimien ja kylmien ajanjaksojen vaihtelut, nk. glasiaali-interglasiaalivaihtelut.

Vuoristojen synty ja häviäminen aiheuttavat myös ilmastovaihteluita. Korkealla vuoristossa lumisateet ovat runsaita ja jäätikköjä pääsee syntyään. Jäätiköt heijastavat auringon säteilyä, jolloin maapallon keskilämpötila laskee. Auringon säteilytehon vaihtelut ja tulivuoritoiminta aiheuttavat kymmenistä vuosista tuhansiin vuosiin kestäviä ilmastonvaihteluita. Ilmastojärjestelmän epälineaarisuudesta ja sen eri osien välisistä kytkennöistä johtuen ilmasto voi vaihdella jonkin verran myös ilman ulkoista syytä.

Ilmakehän koostumuksen muutokset ovat liittyneet ilmaston vaihteluihin. Maapallon historian aikana ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuudet ovat vaihdelleet rajusti. Useimpina lämpiminä ajanjaksoina hiilidioksidia näyttää olleen ilmakehässä selvästi nykyistä enemmän. Etelämantereen jääkairausmittausten perusteella 650 000 viimeisen vuoden aikana hiilidioksidia on ilmakehässä ollut jatkuvasti vähemmän kuin nykyään: pitoisuus on vaihdellut 180 ppm:stä<sup>3</sup> noin 300 ppm:hen. Eniten hiilidioksidia on ollut ilmassa jääkausien välisten lämpimien interglasiaalijaksojen aikana ja vähiten kylmissä glasiaalivaiheissa. Tämä hiilidioksidipitoisuuden vaihtelu ei kuitenkaan ole ollut kylmien ja lämpimien jaksojen vaihteluiden alkusyy vaan näitä vaihteluja voimistanut palauteilmiö.

Tällä hetkellä elämme holoseeni-interglasiaalia. Holoseenin ilmasto on vaihdellut jaksollisesti, ja trendi oli viime ilmasto-optimin (6 000–8 000 vuotta sitten) jälkeen viilenevä, kunnes tätä nykyä lämpötilat ovat olleet ihmisten toiminnan voimistaman kasvihuoneilmiön takia nousussa. Hiilidioksidin pitoisuus ilmakehässä on noussut 1800-luvun alkupuolelta lähtien noin 280 ppm:stä jo yli 380 ppm:ään.

## 2.2 Kasvihuoneilmiön voimistuminen

Ilmakehä läpäisee auringon lyhytaaltoista säteilyä varsin hyvin. Noin puolet maapal-  
lolle saapuvasta säteilyenergiasta imeytyy mantereiden ja merien pintakerrokseen ja muuttuu lämmöksi (kuva 1). Maapallon pinnan lähettämää pitkäaaltoista lämpösäteilyä ilmakehä taas läpäisee varsin huonosti: vain noin kymmenesosa tästä säteilystä pääsee suoraan karkaamaan avaruuteen, 90 % imeytyy ilmakehään. Ilmakehä vastaanottaa lähtää lämpösäteilyä, ja tästä säteilystä osa päätyy lämmittämään maan pintaa. Ilmakehän pilvillä on merkittävä rooli auringosta tulevan ja maan pinnan lähettämän säteilyn kulussa.

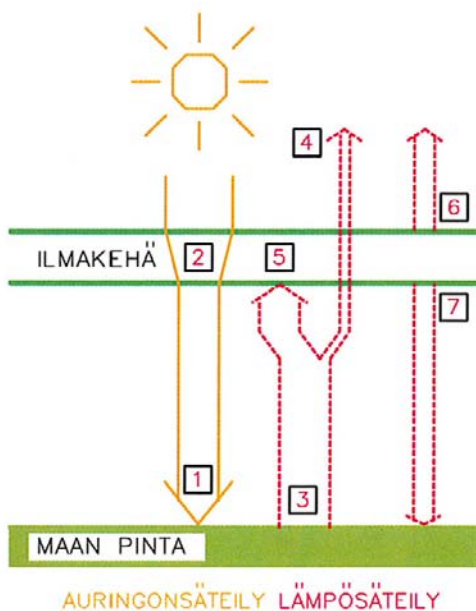
Ilmakehä siis päästää auringon säteilyn suurelta osaltaan lävitseen, mutta on maan lähettämälle lämpösäteilylle lähes läpipääsemätön. Tätä ilmakehän ominaisuutta kutsutaan kasvihuoneilmiöksi. Ilman kasvihuoneilmiötä maan pinnan keskilämpötila olisi noin -18 °C, kun todellisuudessa havaittu keskilämpötila on noin +15 °C. Ilman kasvihuoneilmiötä ei nykyisenkaltaista monimuotoista elämää olisi päässyt kehittymään. Tärkeimmät luonnollista kasvihuoneilmiötä aiheuttavat kaasut, kasvihuonekaasut, ovat vesihöyry ja hiilidioksidi.

---

<sup>3</sup> ppm: parts per million, ilmaisee kuinka monta miljoonasosaa tilavuudesta ilmassa on hiilidioksidia.

Ihmisten toimet ovat huomattavasti lisänneet joidenkin kasvihuonekaasujen, kuten hiilidioksidin, metaanin ja typpioksiduulin pitoisuuksia ilmakehässä. Tämän seurauksena kasvihuoneilmiö on koko ajan voimistumassa, ja muutoksia on jo havaittavissa; esimerkiksi maapallon keskilämpötila on noussut teollistumista edeltävään aikakauden verrattuna noin 0,8 °C (IPCC, 2007a).

**Kuva 1** Yksinkertaistettu kaaviokuva auringon säteilyn (kuvan vasemman reunan keltainen yhtenäinen nuoli) ja lämpösäteilyn (kuvan oikean reunan punaiset katkoviivanuolet) kulusta maapallon ja ilmakehän muodostamassa järjestelmässä. Pääosa auringon säteilystä imeytyy maan pinnalle (1), pienempi osa myös ilmakehään (2). Maan pinnan lähettämästä lämpösäteilystä (3) vain hyvin pieni osa pääsee etenemään ilmakehän läpi avaruuteen (4), valtaosa imeytyy ilmakehään muuttuen takaisin lämpöenergiaksi (5). Myös ilmakehä lähettää lämpösäteilyä, josta osa päättyy avaruuteen (6) ja osa maan pinnalle (7).



Ilmastomme vaihtelee myös luontaisesti. Koko maapallon mitassa lämpimin yksittäinen säävuosi on edelleen 1998. Tuolloin poikkeuksellisen voimakas El Niño aiheutti nousevaan lämpötila-aikasarjaan korkean piikin. Koska lämpeneminen jatkuu edelleen, ennätyksen rikkominen on vain ajan kysymys. Se, että korkeimman lämpötilan mittaamisesta on jo 10 vuotta, ei siis merkitse, että lämpeneminen olisi pysähtynyt. Vuodet 2001–2007 ovat olleet maapallon keskilämpötilan tilastossa sekalaisessa järjestyksessä sijoilla 2–8.

Kasvihuonekaasujen lisäksi ihmiset ovat tuottaneet ilmakehään myös pienhiukkasia (aerosolihiukkasia). Pienhiukkaset itsessään vähentävät maan pinnalle pääsevää auringon säteilyn määrää heijastamalla auringon säteilyä takaisin avaruuteen (suora vaikutus ilmastoon). Lisäksi pienhiukkaset toimivat pilvipisaroita muodostavina tiivistymisytiminä. Pienhiukkasten saastuttamassa ilmassa muodostuu pilviä, joissa on lukumääräisesti paljon pieniä pilvipisaroita. Tällaiset pilvet heijastavat auringon säteilyä tehokkaammin kuin puhtaamman ilman suuripisaraiset pilvet (hiukkasten epäsuora vaikutus ilmastoon). Pienhiukkasten runsaus voi myös pidentää pilvien elinikää ja siten lisätä pilvisyyttä maapallolla.

Ihmisten eri toimien – kuten kasvihuonekaasujen ja pienhiukkasten lisäämisen – vaikutusta ilmastoon voidaan verrata yhteismitallisesti *säteilypakotteen* käsitteen avulla. Positiivinen säteilypakote tarkoittaa ilmastoa lämmittävää vaikutusta, negatiivinen puolestaan viilentävää vaikutusta. Liitteessä 1 on esitetty säteilypakotetta aiheuttavia tekijöitä ja niiden vaikutuksen suuntaa ja voimakkuutta. Esimerkiksi kasvihuonekaasujen lisääntyminen vähentää maapallolta avaruuteen karkaavan lämpösäteilyn määrää (kuva 1), mistä aiheutuu lämmittävä eli positiivinen säteilypakote. Pienhiukkasten lisääntymisestä taas aiheutuu viilentävä eli negatiivinen säteilypakote. Säteilypakotteen yksikkö on  $Wm^{-2}$ .

Ihmisten toimien tähänastista vaikutusta ilmastoon on havainnollistettu liitteen 1 kuvassa vertailemalla eri tekijöistä aiheutuneita säteilypakotteita. Pitkäaikaisten kasvihuonekaasujen lämmittävä vaikutus on noin  $2,6 Wm^{-2}$  ja tästä hiilidioksidin osuus on noin  $1,6 Wm^{-2}$ . Pienhiukkasten lisääntyminen on osittain kumonnut kasvihuonekaasujen lisääntymisestä aiheutuneen pakotteen, mutta ihmisten toiminnan aiheuttama kokonaispakote on silti käytännössä varmasti maapalloa lämmittävä. Tällä hetkellä ihmiskunnan aiheuttama kokonaispakote on noin  $1,6 Wm^{-2}$ .

Ihmisten aiheuttama ilmastomuutos on luonteeltaan maailmanlaajuinen ja nopeampi kuin luonnolliset ilmaston muutokset. Ihmisten aiheuttama ilmaston lämpeneminen on havaittavissa lähes kaikkialla; sekä maan pinta, että meret ovat lämmenneet samanaikaisesti. Tähän tarvitaan ulkoinen positiivinen säteilypakote, kuten kasvihuoneilmaston voimistuminen.

## 2.3 Palauteilmiöt

Ilmaston lämpenemisestä seuraa palauteilmiöitä, joilla voi olla alkuperäistä lämpenemistä hillitsevä tai voimistava vaikutus (taulukko 1). Voimakkaat palauteilmiöt voi-



vat aiheuttaa äärimmäisiä ilmaston muutoksia, joista kerrotaan pääpiirteittäin seuraavassa ja tarkemmin luvussa 3.

**Taulukko 1** Ilmaston lämpenemistä voimistavia ja hillitseviä palauteilmiöitä.

| VOIMISTAVAT, kun ilmasto lämpenee ja hiilidioksidipitoisuus kasvaa      |   |
|---|---|
| Vesihöyryn määrä ilmakehässä kasvaa                                     | → kasvihuoneilmiö voimistuu   |
| Jäätiköiden pinta-ala pienenee  | → albedo* pienenee  |
| Orgaanisen aineen hajoaminen ja soluhengitys lisääntyvät                | → hiilidioksidia vapautuu ilmakehään  |
| Lämpötilan noustessa veden kyky sitoa hiilidioksidia pienenee           | → hiilidioksidia vapautuu meristä   |
| Ikirouta sulaa  | → metaania vapautuu ilmakehään  |
| Merenpohja lämpenee   | → metaanihydraatit sulavat ja metaania vapautuu   |
| Lämpötilan noustessa veden kyky sitoa hiilidioksidia pienenee           | → hiilidioksidia vapautuu meristä   |
| (Sade)metsän tuhoutuminen   | → yhteyttäminen vähenee, maaperän hiiltä vapautuu   |
| Aavikoituminen  | → yhteyttäminen vähenee, maaperän hiiltä vapautuu   |
| HILLITSEVÄT, kun ilman lämpötila ja hiilidioksidipitoisuus kasvavat     |   |
| Lämpösäteilyn intensiteetti kasvaa lämpötilan noustessa                 | → enemmän lämpösäteilyä karkaa avaruuteen   |
| Yhteyttäminen voimistuu   | → hiilidioksidia sitoutuu kasvillisuuteen   |
| Länsi-Afrikan monsuunin voimistuminen                                   | → hiilidioksidia sitoutuu kasvillisuuteen (toisaalta albedo pienenee, voimistava vaikutus)  |
| Aavikoituminen  | → albedo kasvaa, vaalea aavikko heijastaa auringonsäteilyä enemmän kuin tumma metsä   |
| Epävarmoja, voi olla sekä voimistavia, että hillitseviä palauteilmiöitä |   |
| Muutokset merivirroissa   | → esimerkiksi korkeilla leveysasteilla viilenee ja matalilla lämpenee   |
| Muutokset pilvisyydessä   | → esimerkiksi alapilvien lisääntymisen nettovaikutus olisi ilmaston lämpenemistä hillitsevä ja yläpilvien lisääntymisen nettovaikutus sen sijaan ilmaston lämpenemistä voimistava |

\* Albedo on jonkin kappaleen kyky heijastaa siihen osuvaa säteilyä. Tumman kappaleen albedo on pieni ja vaalean suuri.

Tärkein lämpenemistä voimistavista palauteilmiöistä on ilmakehän vesihöyryn määrän lisääntyminen ilmakehän lämmitessä. Ilmaan mahtuvan vesihöyryn määrä kasvaa lämpötilan noustessa hyvin jyrkästi, noin 7 % yhden asteen lämpenemistä kohti. Tämä mahdollistaa sen, että lämpimämmässä ilmastossa ilmassa voi olla enemmän vesihöyryä. Koska vesihöyry on voimakas kasviuonekaasu, sen lisääntyminen voimistaa alkuperäistä lämpenemistä edelleen.

Ilmakehän lämpeneminen muuttaa myös pilvisyyttä. Toistaiseksi ilmastomallien arviot pilvisyyden muutoksista poikkeavat toisistaan, ja tämä on ehkä merkittävin epä-tarkkuuden lähde ilmastomalleissa. Ilmeisesti alapilvien lisääntymisen nettovaikutus olisi ilmaston lämpenemistä hillitsevä, ja yläpilvien lisääntymisen nettovaikutus sen sijaan on ilmaston lämpenemistä voimistava.

Ilmakehä vaihtaa hiilidioksidia myös valtameren kanssa. Vaihdon suunta määräytyy hiilidioksidin osapaineen erosta ilmakehän ja meren pintakerroksen välillä. Jos osapaine on pintavedessä matalampi kuin ilmakehässä, liukenee hiilidioksidia ilmasta mereen ja päinvastoin. Ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kasvaessa yhä suurempi osa hiilidioksidia imeytyy valtameriin. Tämä happamoittaa merivettä ja johtaa meriekosysteemin hiilen kierron häiriintymiseen ja ilmaston lämpenemistä voimistaviin palauteilmiöihin.

Lämpötilan kohotessa hiilidioksidin liukoisuus veteen alenee. Harveyn (2000) mukaan meriveden lämpeneminen yhdellä asteella nostaisi ilman hiilidioksidipitoisuutta aikojen saatossa 3 %, mutta muutos tulisi kestämään vuosisatoja.

Ilmaston lämmitessä merten jääpeitteen ja mannerten lumipeitteen pinta-ala pienenee. Tämäkin aiheuttaa lämpenemistä voimistavan palauteilmiön, sillä paljas maa ja sula vesi heijastavat auringonsäteilyä huomattavasti vähemmän kuin lumi ja jää. Täten aikaisempaa suurempi osuus auringonsäteilystä jää lämmittämään maapalloa ja lämpeneminen voimistuu (luvut 3.2 ja 3.3).

Ilmaston lämmitessä myös lämpöä siirtävät meri- ja ilmavirtaukset voivat muuttua. Tällä voi olla suuri vaikutus lämpötilanmuutosten alueelliseen jakaumaan. Jos merivirrat (esimerkiksi Pohjois-Atlantin termohaliininen kiertoliike, luku 3.4) muuttuvat niin, että ne kuljettavat aikaisempaa vähemmän lämpöä matalilta leveysasteilta korkeille leveysasteille, korkeat leveysasteet jäähtyvät ja matalat lämpenevät. Vaikutus lämpötilaan on todennäköisesti suurempi korkeilla leveysasteilla, joilla lumi- ja jääpeitteen muutokset voimistavat ilmaston muutoksia, kun taas matalilla leveysasteilla lunta ja jäätä ei ole. Keskimääräisesti tällainen muutos siis voisi laskea maapallon keskilämpötilaa tai ainakin jarruttaa ihmisten aiheuttamaa ilmaston lämpenemistä.

Ilmaston lämpeneminen voimistaa kasvillisuuden yhteyttämistä ainakin jossain määrin ja aiheuttaa kasvihuoneilmiön voimistumista hillitsevän palauteilmiön. Toisaalta ilmaston lämpeneminen voimistaa myös kasvien soluhengitystä ja nopeuttaa maaperän orgaanisen aineen hajoamista, mikä lisää metaanin ja hiilidioksidin vuota ilmakehään ja voimistaa kasvihuoneilmiötä (luku 3.5).

Metsien hävitys ja aavikoituminen vähentävät hiilen sitoutumista ja aiheuttavat ilmastoja lämmittävän säteilypakotteen. Toisaalta maanpinnan muuttuminen vaaleammaksi metsien hävityksen tai aavikoitumisen myötä on jonkin verran lisännyt maapallon kykyä heijastaa auringon säteilyä, mikä taas aiheuttaa jäähdyttävän säteilypakotteen. Näiden kahden palautteen tarkkaa nettovaikutusta ei tunneta.

Ilmaston lämpeneminen sulattaa ikiroutaa, mikä nopeuttaa ikiroudassa aikaisemmin jäätyneenä olleen orgaanisen aineen hajoamista. Orgaanisen aineen hajotessa vapautuu kasvihuonekaasuja, mitkä ilmakehään päätyessään edelleen voimistavat kasvihuoneilmiötä (luku 3.6).

Muutokset monsuunituulissa voivat joko voimistaa tai hillitä lämpenemistä (luku 3.8).

Ilmaston lämpenemisen myötä myös merenpohjat lämpenevät pikkuhiljaa. Merten pohjakerrostumiin on sitoutunut suuret määrät metaania jään kaltaisiin yhdisteisiin, metaaniklatraatteihin. Metaaniklatraatit ovat stabiileja suuressa paineessa, kuten 250 metrin syvyydellä meressä, ja riittävän alhaisessa lämpötilassa. Meriveden lämpötilan kohotessa osan metaaniklatraateista oletetaan sulavan ja vapauttavan sisältämänsä metaanin veteen. Osa vapautuneesta metaanista pääsisi edelleen ilmakehään, mikä voimistaisi kasvihuoneilmiötä entisestään (luku 3.10).

## 2.4 Kasvihuonekaasujen päästöskenaariot

Ilmastonmuutoksen suuruus riippuu ratkaisevasti siitä, kuinka korkeiksi hiilidioksidin ja muiden kasvihuonekaasujen pitoisuudet kasvavat. Tämä taas riippuu tulevista päästöistä (sekä kasvihuonekaasujen kiertoon vaikuttavista palauteilmiöistä). Tulevia kasvihuonekaasujen päästöjä ei voida tietää etukäteen. Siksi on luotu joukko erilaisia päästöskenaarioita eli mahdollisia ja sisäisesti johdonmukaisia arvioita päästöjen kehityksestä tulevaisuudessa (esim. Halonen et al., 2008).

Päästöskenaarioita on esitelty yksityiskohtaisesti IPCC:n erikoisraportissa (Nakicenovic ym., 2000). Siinä on tarkasteltu neljää kehityskulkua, joista ensimmäinen

mäinen jakautuu vielä kolmeen alaskenaarioon. Liitteessä 2 esitellään pääpiirteittäin erikseen kulutusyhteiskuntaskenaariot (A-skenaariot) ja kestäväan kehitykseen tähtäävät skenaariot (B-skenaariot).

## 2.5 Ilmastonmuutosmallit

Ilmastomallit kuvaavat ilmastojärjestelmää tietokoneohjelman muotoon kirjoitettujen luonnonlakien avulla. Mallien perustan muodostavat massan, energian ja liikemäärän säilymisen lait. Ilmastomalleissa on ilmakehän lisäksi oma osamallinsa mm. valtamerille, jää- ja lumipeitteelle sekä maaperän lämpö- ja vesitaloudelle, ja biosfäärikin kuvataan karkealla tavalla. Monet taulukon 1 palauteilmiöistä ovat malleissa mukana, eivät kuitenkaan kaikki. Ihmisten toimintaa ilmastomallit eivät kuvaa, joten kasvihuonekaasujen ja pienhiukkasten päästöt tulevaisuudessa pitää malleille erikseen määritellä. Näitä määritelmiä kutsutaan päästöskenaarioiksi, ja ne perustuvat sosioekonomisiin tarkasteluihin.

Ilmastomallia ajettaessa lähdetään liikkeelle jostain realistisesta alkutilanteesta. Kun ilmakehän, valtamerien ym. ilmastosuureiden tila alkuhetkellä tunnetaan, voidaan yhtälöitten avulla laskea muutosnopeudet ilman lämpötilalle, tuulen nopeudelle, meriveden suolapitoisuudelle, maaperän kosteudelle ym. suureille kaikissa mallin pisteissä. Kun eri suureiden muutosnopeudet on laskettu, voidaan mallilla tehdä lyhyt, yleensä muutaman kymmenen minuutin mittainen ennuste. Tämän ennusteen perusteella lasketaan uudet muutosnopeudet, ja niiden avulla simuloidaan ilmakehän käyttäytymistä jälleen eteenpäin. Ilmastoa tutkittaessa mallin annetaan simuloida ilmastojärjestelmää aika-askel kerrallaan kymmenien, satojen tai jopa tuhansien vuosien ajan.

Sääennusteet lasketaan samankaltaisilla periaatteilla kuin ilmastoennusteet. Säänennustusmallille oleellista on ilmakehän lähtötilanteen tarkka tunteminen, sillä virheet lähtötilanteessa kasvavat ennustusajan pidentessä ja säänennusteen epävarmuus kasvaa, mitä pitemmälle ajassa eteenpäin ennustetaan. Ilmastoennusteissa taas on tärkeää tuntea tarkkaan ne tekijät, jotka vaikuttavat ilmastojärjestelmän säteilypakotteeseen pitkällä aikajänteellä. Simuloitaessa ilmastomalleilla kymmeniä tai satoja vuosia ei yksittäisellä säätillä ole ennustettavuutta, mutta ilmasto (eli sään tilastolliset ominaisuudet) pystytään kuvaamaan.

Epävarmuutta ilmastonmuutosennusteissa aiheuttavat ilmaston luonnollinen vaihtelu, epävarmuus tulevaisuuden päästöjen määrästä sekä itse mallien yksinkertaistukset, esimerkiksi puutteet mallien erotuskyvyssä. Rajallisesta laskentakapasiteetista

johtuen nykyisten maa-valtameri-ilmastomallien erottelukyky on tyypillisesti noin 200–300 km vaakasuunnassa. Pystysuunnassa pinnan ja mallin ylärajan, 30–50 km välissä, on noin 30 tasoa, välien ollessa lähellä maan pintaa muutama sata metriä ja stratosfäärissä useita kilometrejä. Vastaavasti meret on kuvattu samankaltaisella tai hiukan tiheämmällä hilalla. Hilaväliä pienemmät ilmiöt, esimerkiksi pilvet, parametrisoidaan eli arvioidaan epäsuorasti ratkaistujen suureiden avulla. Eri ilmastomalleissa pienten ilmiöiden parametrisointi on hoidettu eri tavoin. Tämä on yksi tärkeä syy, miksi myös ennustetut ilmastonmuutokset poikkeavat eri malleissa toisistaan.

Ilmastomallien epävarmuutta lisäävät myös epävarmuudet palauteilmiöissä (kpl 2.3), pienhiukkasten aiheuttamassa suorassa ja epäsuorassa säteilypakotteessa sekä pilvien rakenteessa.

Ilmastomalleja testataan ajamalla niitä historiallisilla säteilypakotearvoilla ja vertaamalla mallien tuloksia toteutuneeseen ilmastoon. Mallin kyky kuvata menneitä ilmastoja ei kuitenkaan ole koko totuus sen kyvystä ennustaa tulevaa ilmastoa, sillä odotettavissa oleva ilmastonmuutos vie maapallon ilmaston tilaan, jollaisesta ei ole havaintoja ilmastomallin ennustustarkkuuden määrittämiseksi. Ilmastonmuutostenusteiden epävarmuuden mittana käytetäänkin usein ilmastonmuutoksen vaihtelua eri mallien välillä.

Epävarmuuksistaan huolimatta mallit ovat osoittaneet, että tiettyjä ilmiöitä niillä voidaan ennustaa. Jo IPCC:n ensimmäisessä arviointiraportissa (Houghton et al., 1990) esitettiin mallilaskelmia Arktisen alueen voimakkaasta lämpenemisestä. Näiden perusteella olisi voinut ennakoita mm. nähtävissä olevaa merijään vähenemistä. 1990-luvun alun jälkeen ilmastomallit ovat entisestään kehittyneet ja tarkentuneet.

## 2.6 Arvioiden luotettavuudesta

Edellisessä kappaleessa (2.5) on kerrottu, että tietokoneilla lasketuissa ilmastonmuutosennusteissa epävarmuutta aiheuttavat ilmaston luonnollinen vaihtelu, epävarmuus tulevaisuuden päästöjen määrästä sekä itse mallien yksinkertaistukset. Epävarmuutta ilmastoennusteissa lisäävät myös epävarmuudet palauteilmiöissä (kappale 2.3), pienhiukkasten aiheuttamassa suorassa ja epäsuorassa säteilypakotteessa sekä pilvien rakenteessa. Eri malleilla ja päästöskenaarioilla lasketut ennusteet poikkeavat keskenään niin paljon, että lämpenemisennuste kuluvalle vuosikaudalle vaihtelee 1,1°C:sta (alaraja B1-skenaariolle) 6,4 °C:een (yläraja A1FI-skenaariolle) (liite 3).

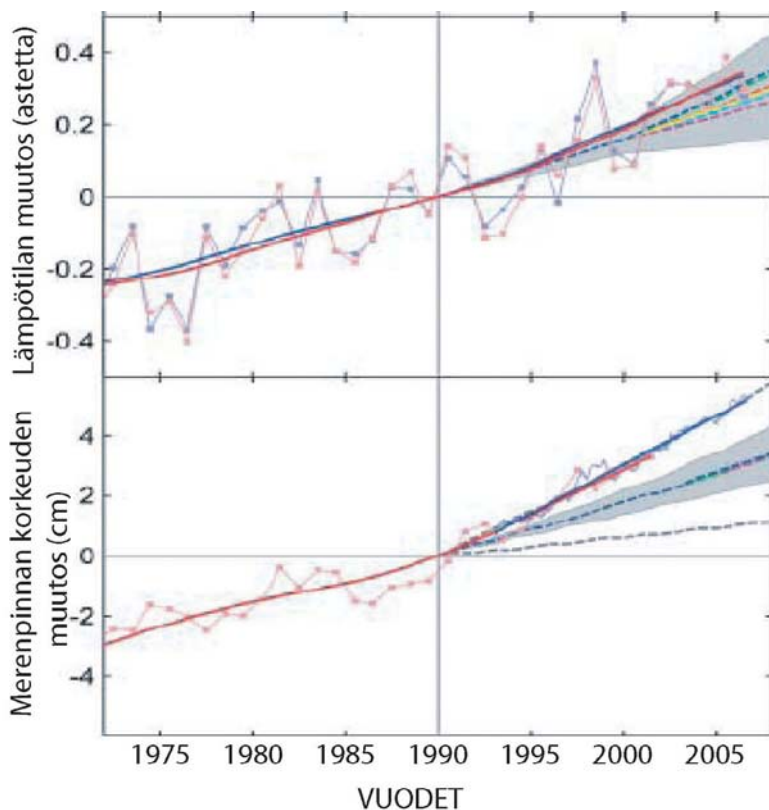
Rahmstorf et al. (2007) vertasivat IPCC:n kolmannen arviointiraportin (Houghton et al., 2001) vuosien 1990–2006 lämpötilan ja merenpinnan kohoamisen ennustetta ja havaittua muutosta (kuva 2). Kuvassa (2) nähdään, että lämpötilan ennusteen suhteen mennään malleista saadun arvion ylärajalla ja merenpinnan suhteen ylärajan yläpuolella. Lämpötilan osalta havaittu ennusteiden ylärajalla liikkuminen voi vielä olla luonnollista vaihtelua, mutta merenpinnan kohoamisen osalta ennusteet ovat ilmeisiä aliarvioita.

**Kuva 2** Muutoksia maapallon keskilämpötilassa ja merenpinnan korkeudessa vuoden 1973 jälkeen, verrattuna IPCC:n kolmannen arviointiraportin skenaarioihin [v. 2001, katkoviivat, (A1FI: vaalean sininen; A1B: purppuranpunainen; A1T: sininen; A2: punainen; B1: keltainen; B2: vihreä) ja harmaat alueet].

Ylempi kuva: Vuoden keskilämpötila maa- ja merialueille ja niiden trendit, NASA/GISS (punainen) ja Hadley keskus/Ilmastotutkimusosasto (sininen).

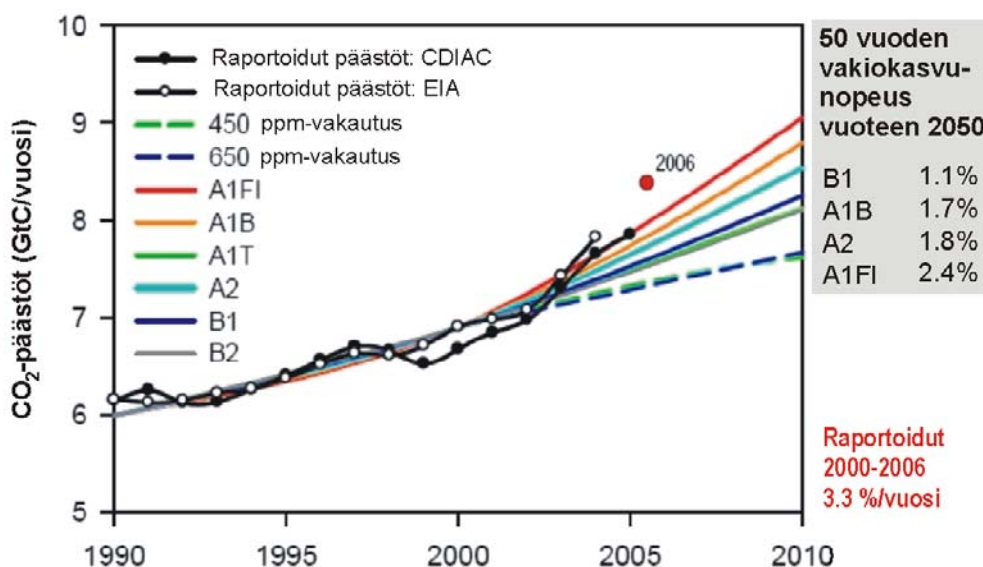
Alempi kuva: merenpinnan korkeus perustuen vuorovesimittauksiin (vuosikeskiarvo, punainen) ja satelliittimittauksiin (3 kk keskiarvo, sininen) ja niiden trendit.

Lämpötila ja merenpinnan korkeus on kuvattu poikkeamina vuoden 1990 tasosta, mikä on IPCC:n skenaarioiden alkamisvuosi.



Viime vuosien aikana kasvihuonekaasujen päästöt ovat Raupachin et al. (2007) ja Zhengin et al. (2008) tutkimusten mukaan kasvaneet jopa nopeammin kuin oli arvioitu. Maailmanlaajuiset hiilidioksidipäästöt ylittivät vuonna 2006 IPCC:n SRES-skenaarioiden suurimpien päästöjen A1FI-skenaarion (kuva 3). Tämä johtuu erityisesti kehittyvien maiden (ja erityisesti Kiinan) sähköntuotanto- ja liikennesektorien kasvusta ja tehottoman energiateknologian käytöstä.

**Kuva 3** Maapallonlaajuisen hiilidioksidipäästöjen kehitys toteumaa kuvaavien arvioiden (CDIAC ja EIA) sekä skenaarioiden mukaan. Toteutuneet maapallonlaajuiset hiilidioksidipäästöt ylittivät vuonna 2006 IPCC:n skenaarioiden arviot (lähde: [http://biopact.com/2007\\_10\\_21\\_archive.html](http://biopact.com/2007_10_21_archive.html)).



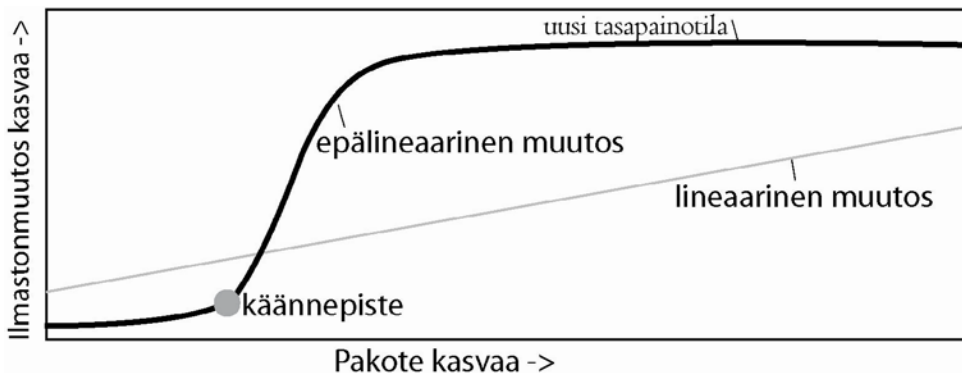
### 3 EPÄLINEAARISTEN JA ÄÄRIMMÄISTEN ILMASTON MUUTOSTEN MAHDOLLISUUS

#### 3.1 Lineaarinen ja epälineaarinen ilmaston muutos

Lineaarinen ilmaston muutos tarkoittaa ilmaston muutosta, jossa muutos seuraa lineaarisesti muutoksen aiheuttajaa, pakotetta (kuvassa 4 harmaa käyrä). Ihmiskunnan kasvihuonekaasupäästöjen aiheuttama kasvihuoneilmaston voimistuminen ja ilmaston maailmanlaajuinen lämpeneminen on nykykäsityksen mukaan esimerkki lineaarisesta ilmaston muutoksesta, sillä maapallon keskilämpötilan muutos seuraa melko tasaisesti ilmakehän kasvihuonekaasujen kasvua.

Epälineaarissa ilmaston muutoksessa ilmastosysteemi ajautuu jonkin kynnysarvon, käänne pisteen (engl. tipping point) yli, ja tämän käänne pisteen ylittäminen käynnistää ulkoista pakotetta suuremman, epälineaarisen muutoksen (kuvassa 4 musta käyrä) (esim. Alley et al., 2002).

**Kuva 4** Skemaattinen kuva lineaarisesta ja epälineaarista ilmaston muutoksesta.



Esimerkkinä luonnollisista epälineaarista ilmaston muutoksista ovat jääkausiaikojen kylmien ja lämpimien ajanjaksojen vaihtelut, joiden käynnistävänä pakotteena toimivat maapallon kiertoradan ja akselikallistuman vaihtelut. Pakotteiden aikaskaala on kymmeniä tuhansia vuosia, mutta palauteilmiöt kiihdyttävät muutosta, ja jääkausiaikojen kylmien ja lämpimien ajanjaksojen vaihtumiset tapahtuvat huomattavasti nopeammin: muutamissa tuhansissa vuosissa. Ihmisten aiheuttama maailmanlaajui-



nen lämpeneminen käynnistää ilmaston lämpenemistä voimistavia tai heikentäviä palauteilmiötä, jotka voivat epälineaarisesti johtaa äärimmäisiin ilmaston muutoksiin, kuten esimerkiksi Pohjoisen jäämeren jääpeitteen sulamiseen tai valtameren kierto- liikkeen nopeaan muutokseen.

Lenton et al. (2008) pyrkivät laajentamaan epälineaarisen ilmaston muutoksen määritelmää ottamalla huomioon ilmaston muutokseen liittyviä yhteiskunnallisia ja poliittisia näkökulmia. He määrittelivät käänteentekeviksi ilmiöiksi ne:

- jotka ovat horisontaalisuunnassa laajuudeltaan ainakin suuruusluokkaa 1 000 km.
- joille on olemassa kriittinen käänneaste, minkä saavuttaminen aiheuttaa merkittävää haittaa ihmiskunnan hyvinvoinnille tai tuhoaa ainutlaatuisia ekosysteemejä.
- joihin ihmisten toiminta vaikuttaa niin, että poliittiset päätökset kuluvan vuosisadan aikana määräävät saavutetaanko kriittinen käänneaste.
- joissa muutoksia tullaan havaitsemaan niin läheisessä tulevaisuudessa (viimeistään useiden vuosisatojen aikana), että ne vaikuttavat tämän päivän poliittisiin päätöksiin.

Näiden määritelmien mukaisia käänteentekeviä ilmiöitä ja niille Lentonin et al. (2008) määrittelemiä kriittisiä kynnyksarvoja ja siirtymäaikoja on kirjattu taulukoon 2 ja hahmoteltu kuvaan 5. Ilmiöt on esitelty likimääräisessä todennäköisyysjärjestyksessä, alkaen todennäköisimmästä boreaalisten metsien laaja-alaiseen katoamiseen asti. Ikiroudan sulaminen ja merten metaaniklatraattien sulaminen eivät ole todennäköisyysjärjestyksessä, koska ilmiöt tunnetaan huonosti. Seuraavissa kappaleissa on esitelty näitä mahdollisia epälineaarisia ja äärimmäisiä ilmaston muutosilmiöitä, jotka voisivat seurata ihmisten aiheuttamasta ilmastonmuutoksesta.

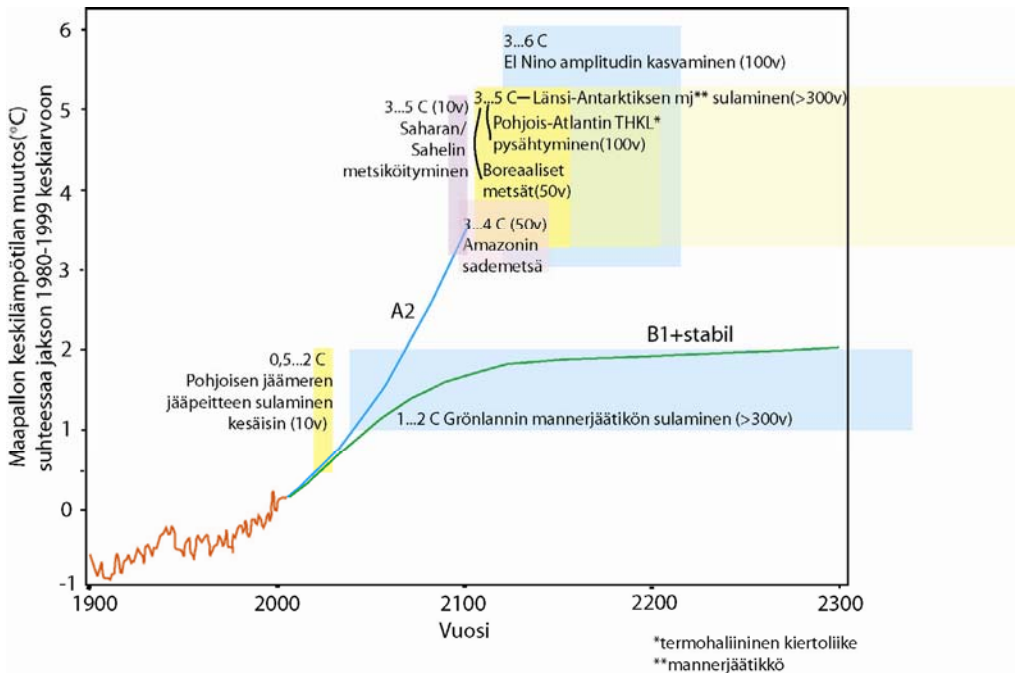
**Taulukko 2** Ilmiöitä, joissa voi ilmaston lämpenemisen myötä tapahtua muutoksia, jotka voivat edelleen laukaista äärimmäisiä tai epälineaarisia ilmaston muutoksia. (lähde: Lenton et al., 2008).

| Käänteentekevä ilmiö ja sen muuttuva ominaisuus              | Ilmiön muutoksen aiheuttaja                                    | Arvioitu käänne-<br>piste maailman-<br>laajuisessa läm-<br>penemisessä * | Siirtymäaika<br>(vuosia) kään-<br>nepisteen<br>saavuttamisen<br>jälkeen | Keskeiset vaikutukset   |
|--|--|--|---|---|
| Pohjoisen jäämeren jääpeitteen sulaminen kesäisin            | Paikallinen ilman lämpötilan muutos, valtameren lämmönkuljetus | +0,5–2 °C  | ≈ 10  | Lämpenemisen voimistuminen, ekosysteemin muuttuminen  |
| Grönlannin mannerjäätikön sulaminen osittain tai kokonaan    | Paikallinen ilman lämpötilan muutos                            | +1–2 °C  | > 300   | Merenpinnan korkeus +2...7 m  |
| Länsi-Antarktiksien mannerjäätikön sulaminen                 | Paikallinen ilman lämpötilan muutos                            | +3–5 °C  | > 300   | Merenpinnan korkeus +5 m  |
| Pohjois-Atlantin termohaliinisen kiertoliikkeen pysähtyminen | Makean veden lisäys Pohjois-Atlantin valtameriin               | +3–5 °C  | ≈ 100   | Paikallinen viileneminen, merenpinnan korkeuden muutokset, trooppisen konvergensivyöhykkeen siirtyminen |
| El Niño – eteläinen värähtely – amplitudin kasvaminen        | Termokliinin** syvyys, termokliinin paksuus                    | +3–6 °C  | ≈ 100   | Kuivuus Kaakkois-Aasiassa ja muualla  |
| Etelä-Aasian kesämonsuunin heikkeneminen                     | Intian planetaarinen albedo                                    | -  | ≈ 1   | Kuivuus, ekosysteemin kantokyvyn aleneminen   |
| Saharan/Sahelin metsäköityminen ja Länsi-Afrikan monsuuni    | Sadanta  | +3–5 °C  | ≈ 10  | Ekosysteemin kantokyvyn nousu   |
| Amazonin sademetsän laaja-alainen katoaminen                 | Sadanta, kuivan kauden pituus                                  | +3–4 °C  | ≈ 50  | Elollisen luonnon monimuotoisuuden väheneminen, sadannan pieneneminen                                   |
| Boreaalisten metsien laaja-alainen katoaminen                | Paikallinen ilman lämpötilan muutos                            | +3–5 °C  | ≈ 50  | Eliöyhteisön vaihtuminen  |
| Ikiroudan sulaminen  | Ikiroudan lämpötilan muutos                                    | -  | <100  | Metaanin ja hiilidioksidin vapautuminen   |
| Merten metaaniklatraattien sulaminen                         | Merenpohjan sedimenttien lämpötilan muutos                     | epäselvä   | 1 000–10 000  | Maailmanlaajuisen lämpenemisen voimistuminen  |

\* verrattuna vuosien 1980–1999 maailmanlaajuisen keskilämpötilaan

\*\* termokliini on vyöhyke, jossa veden lämpötila muuttuu syvyysuunnassa paljon lyhyellä matkalla

**Kuva 5** Lentonin et al. (2008) määrittelemät käännepeisteet verrattuna lämpenemisennusteisiin A2- ja B1-skenaarioille. Laatikoiden sijainti ja koko kuvaavat ilmiöiden ajoittumista ja siirtymäaikaa. Laatikoiden korkeus kuvaa käännepeisteen vaihtelualuetta, vasen alakulma on suurin piirtein siinä kohtaa lämpenemisennustetta, missä ilmiön alin käännepeiste on määritetty. Laatikoiden leveys kuvaa ilmiön siirtymäaikaa. Pohjoisen jäämeren jääpeitteen laatikko on kapea, koska sulamisen arvioidaan tapahtuvan noin vuosikymmenessä, ja Grönlannin mannerjäätikön laatikko ulottuu kuvan ulkopuolelle, sillä sille määritelty 300 vuoden alaraja sulamiselle ylittää kuvan vaaka-akselin.



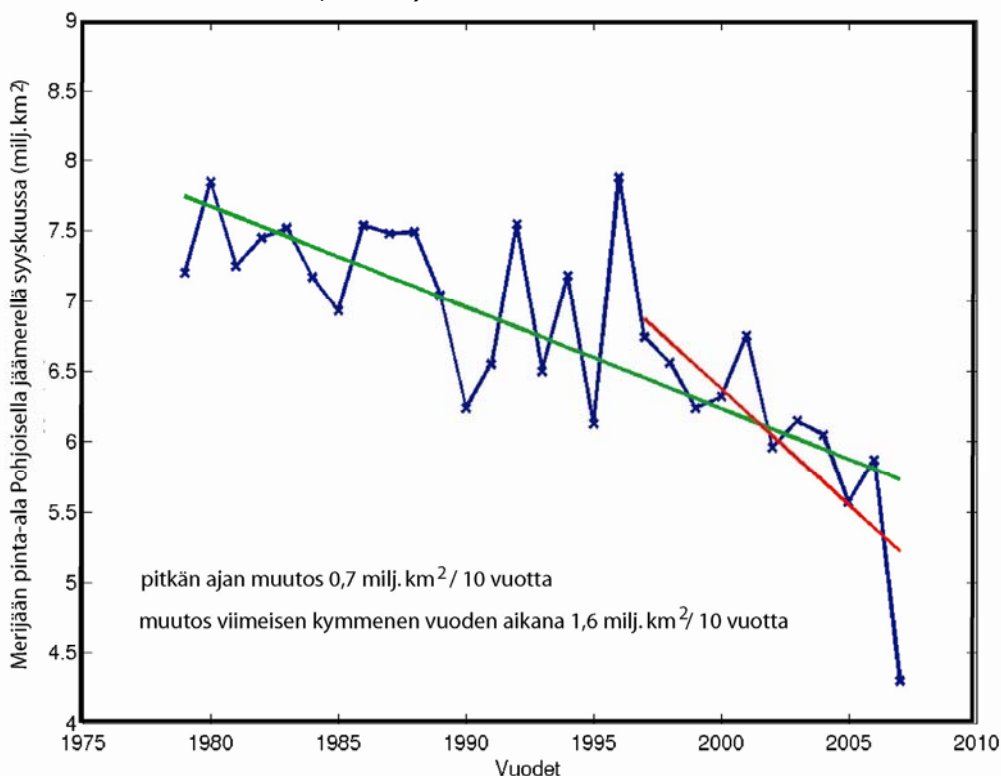
### 3.2 Pohjoisen jäämeren jääpeitteen sulaminen

Pohjoisen jäämeren jääpeitteen (myös arktinen merijää) keskimääräinen vuotuinen laajuus on jaksolla 1978–2005 tehtyjen satelliittihavaintojen perusteella pienentynyt noin 3 % vuosikymmenessä. Kesällä jään pinta-alan väheneminen on ollut selvästi nopeampaa, noin 7 % vuosikymmenessä (IPCC, 2007a). Viimeisten kymmenen vuoden aikana merijään sulaminen on kiihtynyt. Merijään sulaessa sen alta paljastuu jäätä paljon tummempia merenpinta. Merenpinta imee enemmän säteilyä kuin jää ja voimistaa lämpenemistä (jää-albedo -palauteilmiö). Teoriassa jään sulamista lisäävät

myös nokipäästöt, jotka tummentavat jäätä, jolloin se imee enemmän säteilyä ja voimistaa lämpenemistä. Kuitenkaan ei ole pystytty osoittamaan, että nokipäästöillä ja niiden albedo-palauteilmiöllä olisi suurta merkitystä, vaan vaikuttaa siltä, että niiden merkitys on vähäpätöinen.

Pohjoisen jäämeren jääpeite on laajuudeltaan pienimmillään syyskuun aikana. Viime syyskuussa (vuonna 2007) arktista merijäätä oli ennätysvähän (kuva 6). Tähän ovat vaikuttaneet sekä luonnolliset vaihtelut ilmakehän yleisessä kiertoliikkeessä, ihmisten toiminnan aiheuttama ilmastonmuutos sekä ilmaston lämpenemistä voimistava jää-albedo palauteilmiö. Jään viimeaikainen nopea sulaminen Pohjoisella jäämerellä viittaa siihen, että käänne piste olisi saavutettu, ja että jääpeite sulaa muuttuneen albedon takia kiihtyvällä vauhdilla. Lindsay ja Zhang (2005) uskovat, että käänne piste saavutettiin jo vuonna 1989 arktiselle merijää -systemille. Vielä ei kuitenkaan olla asiasta yksimielisiä (Holland, 2006).

**Kuva 6** Pohjoisen Jäämeren jään syyskuisen pinta-alan muutos (lähde: National Snow and Ice Data Center, NSIDC).



IPCC:n käyttämistä ilmakehä-valtamerialueille puolet ennustaa, että tämän vuosisadan aikana Pohjoisen jäämeren jääpeite katoaisi syyskuussa kokonaan, jos napaseutujen vuotuinen keskilämpötila kohoaa -9 asteeseen eli 9 astetta nykyistä korkeammaksi. Malleissa siirtyminen syyskuun jäätömään tilaan tapahtuu epälineaarisesti, mutta yleispätevä kynnyksarvo on vielä määrittelemättä. Äärimmäisessä lämpenemistilanteessa – napaseudun lämpötilojen kohotessa yli -5 asteeseen (13 astetta nykyistä korkeammaksi) – kaksi IPCC:n mallia ennustaa myöhemmin mahdollisesti saavutettavassa äärimmäisessä lämpenemistilanteessa koko arktisen merijään täydellistä katoamista (jolloin meri olisi talvisinkin sula) (Winton, 2006). Toisessa näistä mallisimulaatioista uuteen tasapainotilaan siirrytään epälineaarisesti alle kymmenessä vuodessa, ja toisessa mallisimulaatiossa muutos tapahtui lineaarisemmin. Lenton et al. (2008) otaksuvat, että kynnyksarvo kesäisen arktisen merijään katoamiselle voidaan saavuttaa jo seuraavan kymmenen vuoden sisällä, ellei sitä ole jo saavutettu. Koko arktisen merijään ympärivuotinen katoamisen aiheuttavan kynnyksarvon saavuttamista tällä vuosisadalla sen sijaan pidettiin epätodennäköisempänä.

### 3.3 Muutoksia mannerjäätiköissä

Mannerjäätikkö on maan päällä oleva satojen metrien tai jopa kilometrien paksuisen jään kattama laaja alue. Jäätikkö syntyy, kun on niin kylmää, ettei satanut lumi sulaa kesän aikana. Näin lumi kerrostuu, ja pohjalla oleva lumi pakkautuu yläpuolella olevien kerrosten painon takia tiiviiksi ja lopulta jääksi. Jos jään paksuus ylittää 50–120 metriä, paine jäätikön pohjalla saa jään käyttäytymään hyytelömäiseen tapaan, ja jäätikkö alkaa virrata alamäkeen. Jäätikön virratessa rantaviivan yli, muodostuu jäähyilly, jäämassa, mikä on kiinni rannikossa tai maan päällä lepäävässä jäätikössä ja kelluu meressä. Koska jäähyillyt kelluvat, niiden sulaminen tai hajoaminen ei periaatteessa nosta merenpintaa. Epäsuorasti ne voivat kuitenkin vaikuttaa merenpinnan tasoon. Etelämantereen jäähyillyjen laajamittainen murtuminen saattaisi nopeuttaa jään virtausta pois mantereelta, koska hyllyt toimivat eräänlaisena jarruna jäätikön virtaukselle. Lisäksi jään sulaminen voisi nopeutua, koska jäähyillyt pitävät lämpimämmän meri-ilman ja veden loitolla mannerjäätiköstä. Antarktiksien niemimaalla, jossa jäähyillyjen murtumista on tapahtunut, on jo havaittu joidenkin jäätiköiden liikkeen nopeutuneen. Myös Grönlannin suurimman laskujäätikön, Jakobshavn Isbræen, liikkeen kiihtyminen näyttää olevan yhteydessä jäätikön kelluvan kielekkeen vetäytymiseen. Jäätikön liikkeeseen vaikuttavat kuitenkin monet tekijät, ja jäähyillyjen vaikutus siihen on yhä kiistanalainen asia.

Jäätiköiden massataseiden muutokset vaikuttavat suoraan valtameren pinnakorkeuteen. Edellisellä lämpökaudella noin 120 tuhatta vuotta sitten Grönlannin jäätikkö oli ainakin osittain sulana ja valtameren pinnankorkeus oli 4-5,5 metriä nykyistä korkeammalla. Tästä Grönlannin jäätikön osuuden arvioidaan olevan noin 2 metriä (Cuffey et al., 2000).

Valtamerten havaittu pinnannousu jaksolla 1993–2003 oli IPCC:n (2007a) mukaan  $3,1 \pm 0,7$  mm vuodessa (tasaisella nopeudella jatkuessaan 31 cm sadassa vuodessa). Valtameren pinnannousu johtuu merten lämpölaajenemisesta, vuoristojäätiköiden ja mannerjäätiköiden sulamisesta ja merenpohjan noususta/laskusta. On arvioitu, että lämpölaajenemisen vaikutus havaitusta muutoksesta on  $1,6 \pm 0,5$  mm vuodessa, vuoristojäätiköiden sulamisen osuus  $0,77 \pm 0,22$  mm vuodessa ja mannerjäätiköiden osuus  $0,42 \pm 0,42$  mm vuodessa.

### 3.3.1 Grönlannin mannerjäätikkö

Yksi kahdeskymmenesosa maailman jäästä on Grönlannin mannerjäätikössä. Jos Grönlannin mannerjäätikkö sulaisi kokonaan, nostaisi se merenpinnan korkeutta seitsemän metriä. Satelliitti- ja in situ (paikan päällä tehdyt) -mittaukset osoittavat, että viimeisten 25 vuoden aikana Grönlannin mannerjäätiköllä sulaminen ja jäätikön virtaukset ovat voimistuneet. Viimeisten neljän kesän aikana Grönlanti on menettänyt keskimäärin 380–490 miljardia tonnia jäätä joka vuosi, mikä on keskimäärin 150–200 miljardia tonnia enemmän kuin lunta kertyy talven aikana (Witze, 2008). Tämä aiheuttaa valtameren pinnannousua noin 0,5 mm vuodessa (tasaisella nopeudella jatkuessaan noin 5 cm sadassa vuodessa).

Grönlannin mannerjäätikön kehityksestä tehdyt pitkän ajan simulaatiot näyttävät jäätikön merkittävää pienenemistä ilmaston lämmitessä tulevana vuosisatoina. Olemassa olevilla jäätikkömalleilla ei kuitenkaan ole pystytty ennustamaan mannerjäätiköissä viime aikoina (viimeiset 5 vuotta) tapahtuneita laaja-alaisia ja nopeita sulamisia.

Jäätikkötutkijat ovat melko yksimielisiä siitä, että jos ilmaston lämpeneminen jatkuu, niin Grönlannin jäätikkö tulee aikaa myöten väijäämättä sulamaan. Sulamisen nopeus on kuitenkin vielä täysin avoin kysymys. Arktisen merijään sulaminen tulee melko todennäköisesti kiihdyttämään myös Grönlannin jäätikön sulamista.

IPCC:n neljännessä arviointiraportissa esitettiin arvio, että mikäli maapallon keskilämpötila kohoaa 1,9...4,6 astetta esiteolliseen aikaan verrattuna (noin 1,4...4,2 astetta nykytasoon verrattuna), ylitetään kynnyksiarvo, jonka ylityttyä Grönlannin man-

nerjäätikö vuosisatojen kuluessa vääjäämättä sulaa. Osa mallisimulaatioista myös näyttää, että vaikka lämpötila kynnysarvon ylityksen jälkeen jälleen laskisi kynnysarvon alapuolelle, voi olla, ettei se pysty estämään jäätikön sulamista. Tämä johtuisi siitä, että jään sulamisen jälkeen jäättömän alueen ilmasto olisi lämmennyt liian lämpimäksi jäätikön kasvamisen kannalta. Jäättömiksi jääneillä alueilla albedon pieneneminen kiihdyttäisi paikallisesti ilmaston lämpenemistä. Myös jään kasautumisalueella lämpötila olisi sulamisen seurauksena korkeampi kuin aikaisemmin, mikä voimistaisi sulamista ja johtaisi siihen, että entistä suurempi osa sateesta tulisi vetenä eikä lumena. Lisäksi jäätikön pinnalla tapahtuva sulaminen kiihdyttäisi jäätikön virtausta.

Lenton et al. (2008) ovat Grönlannin mannerjäätikön sulamisen suhteen pessimistisempiä kuin IPCC:n neljäs arviointiraportti. He esittivät kynnysarvoksi maailmanlaajuisen keskilämpötilan kohoamista 1...2 asteella. He perustelevat arviotaan sillä, että Grönlannin lämpeneminen voi olla oletettua voimakkaampaa, johtuen arktisen merijään nopeammasta häviämisestä, kuin mallisimulaatioissa. Perusteluna esitetään myös viimeaikaisia havaintoja jäätikön massan vähenemisestä kiihtyvällä vauhdilla (esim. Witze, 2008), ja ettei näitä viimeaikaisia nopeita muutoksia olla jäätikkömailla pystytty simuloimaan. Lenton et al. (2008) pitävät arvioissaan mahdollisena, että nopeimmillaan Grönlannin mannerjäätikön sulaminen tapahtuu jo 300 vuodessa.

### 3.3.2 Länsi-Antarktisen mannerjäätikkö

Länsi-Antarktisen mannerjäätikön jäätikkövirtausten Amundsenin mereen on havaittu kiihtyneen. Länsi-Antarktisen mannerjäätikön mahdollista sulamista maailmanlaajuisen lämpenemisen myötä on tutkittu useita vuosia. Täydellinen sulaminen johtaisi maailmanlaajuisesti merivedenpinnan kohoamiseen viidellä metrillä (Vaughan, 2007). Länsi-Antarktisen mannerjäätikkö on tutkimusten mukaan vetäytynyt ainakin kerran viimeisten kahden miljoonan vuoden aikana (Scherer et al., 1998), mutta vetäytymisen tarkkaa ajoitusta ja suuruutta ei tunneta.

Suurin osa nykyisestä Länsi-Antarktisen mannerjäätiköstä on merenpinnan alapuolella kiinni merenpohjassa. Tämä osa voisi irrota, mikäli pohjautumisvyöhykkeen – meressä kelluvan jäähyllyn ja maalla lepäävän jäätikön välisen rajan – vetäytyminen laukaisee voimakkaan positiivisen palauteliön, jossa merivesi kuluttaa alhaalta päin jäätikköä ja laukaisee merenpohjasta irtoamisen. Länsi-Antarktisen mannerjäätikön vetäytyminen voi myös voimistua jäätikön virtauksen kiihtymisen ja jäähylljen irtoamisen myötä. Jäähylljen irtoamisen voi laukaista niiden alla olevan meriveden lämpeneminen tai niiden pinnan sulaminen. Sulamispisteen saavuttamiseksi kesäisin

suurten Rossin ja Fischer-Ronne jäähylyjen alueella tulisi paikallisen ilmaston lämmetä noin 5 astetta. Kynnysarvo valtameren lämpenemiselle on arvioitu alemmaksi (Oppenheimer, 2004). Länsi-Antarktisen mannerjäätikkö itse vaatisi noin 8 asteen lämpenemistä eteläisillä leveysasteilla 75–80, jotta sulamispiste saavutettaisiin keksäisin.

IPCC:n neljännessä arviointiraportissa ei anneta ennustetta tai kynnysarvoa Länsi-Antarktisen mannerjäätikön sulamiselle, mm. johtuen siitä, ettei olemassa olevilla jäätikkömalleilla ei ole pystytty ennustamaan mannerjäätiköissä viime aikoina tapahtuneita laaja-alaisia ja nopeita sulamisia. Lenton et al. (2008) esittävät kynnysarvoksi 3...5 °C maailmanlaajuisista lämpenemistä, ottaen huomioon havainnot Antarktisen mannerjäätikön viimeaikaisesta massan pienenemisestä (Velicogna, 2006). Lenton et al. (2008) pitävät Antarktisen mannerjäätikön sulamisen aikaskaalaa hyvin epävarmana, mutta arvioivat, että merkittäviä muutoksia voisi tapahtua jo tämän vuosisadan kuluessa, ja romahtaminen pahimmassa tapauksessa jo 300 vuoden kuluessa. Lentonin et al. (2008) arvioiden mukaan nopean meriveden korkeuden nousun (>1 m vuosisadassa) voisi todennäköisemmin aiheuttaa Antarktisen mannerjäätikkö kuin Grönlannin mannerjäätikkö. Kynnysarvo Antarktisen jäätikön sulamiselle näyttäisi kuitenkin olevan korkeampi.

### 3.4 Pohjois-Atlantin termohaliinisen kiertoliikkeen heikentyminen

Valtamerillä on merkittäviä tehtäviä maapallon energian ja veden kiertokulun ylläpitämisessä. Valtameret kuljettavat lämpöä tropiikista napa-alueille ja siten tasaavat maapallolle epätasaisesti jakautunutta auringon energiaa. Valtameren toinen tärkeä tehtävä on kuljettaa pohjoisille leveysasteille satanut vesi takaisin trooppiin ilmakehään haihdutettavaksi. Lisäksi valtamerien pintakerrokseen on sitoutunut suuret määrät lämpöä, ja siten meret tasoittavat ilman lämpötilaeroja; merten läheisyydessä ilman lämpötilan vuorokautinen ja vuodenaikainen vaihtelevuus on huomattavasti pienempää kuin mantereisilla alueilla. Valtameret vaikuttavat myös ilmaston luonnolliseen vaihtelevuuteen.

Viimeisen kahdenkymmenen vuoden aikana on tutkittu ilmastonmuutoksen vaikutusta Pohjois-Atlantin kiertoliikkeeseen ja sitä äärimmäistä uhkakuva, että ilmastonmuutos pysäyttäisi merten kiertoliikkeen. Mediassa ja monien kansalaisten mielissä Pohjois-Atlantin kiertoliikkeen ymmärretään tarkoittavan samaa kuin Golfvirta. Tarkkaan ottaen Golfvirta on osa laajempaa Pohjois-Atlantin virtausjärjestelmää. Tieteellisessä keskustelussa Golfvirta ja Pohjois-Atlantin kiertoliike ovat selkeästi kaksi eri



asiaa, ja valitettavasti nämä termit sekoittuvat usein uutisissakin ja aiheuttavat siten väärinkäsityksiä.

Pohjois-Atlantin kiertoliikettä kutsutaan englanniksi termillä MOC (Meridional Overturning Circulation), jolla tarkoitetaan Atlantin valtameren pohjois-eteläsuuntaista kiertoliikettä, jossa pintavirtauskenttä suuntautuu etelästä pohjoiseen kuljettaen lämpimiä ja suolaisia vesimassoja kohti pohjoista, missä ne jäähtyvät ja vajoavat meren syvimpiin kerroksiin. Syvimmissä kerroksissa vesimassat kulkeutuvat kohti etelää ja lopuksi ne kohoavat meren pintakerrokseen kumpuamisen seurauksena. Pohjois-Atlantin kiertoliike koostuu tuulien synnyttämistä pintavirtauksista, kuten Golfvirta, ja meriveden tiheyserojen aiheuttamista virtauksista. Tiheyserojen aiheuttamaa virtauskenttää kutsutaan myös termohaliiniseksi kiertoliikkeeksi. Teoreettisesti on osoitettu, että termohaliinisen kiertoliikkeen voimakkuuteen vaikuttavat epälineaarisesti lämpötila ja suolaisuuden muutokset. Tämä tarkoittaa, että pienikin muutos energia- tai vesitaseessa voi aiheuttaa suuren muutoksen Pohjois-Atlantin kiertoliikkeessä.

Viimeisen jääkauden loppuvaiheessa (siis silloin kun ilmasto on alkanut lämmetä, mutta mannerjäätiköt vielä peittivät Skandinavian ja Pohjois-Amerikan) ilmastossa on havaittu äkillistä kylmenemistä. Tämä on aiheutunut mahdollisesti siitä syystä, että mannerjäätiköistä on purkautunut kerralla suuret määrät jäävuoria tai/ja makeaa vettä jäätikköjärvistä.

Viimeisimmän kymmenen vuoden aikana on erityisesti tutkittu, miten makean veden tase vaikuttaa Pohjois-Atlantin kiertoliikkeen voimakkuuteen. Numeerisilla malleilla on tehty kokeita, joissa meren pintakerrokseen on lisätty suuret määrät makeaa vettä. Tämä on johtanut termohaliinisen kiertoliikkeen heikkenemiseen, joissakin tapauksissa jopa sen täydelliseen pysähtymiseen ja Pohjois-Euroopan ilmaston kylmenemiseen useilla asteilla. Täytyy kuitenkin ottaa huomioon, että malleihin syötetty makean veden taseen muutos vastaa Grönlannin jäätikön sulamista yhdellä kuudesosalla sadan vuoden aikana, eikä ole varmaa, voiko Grönlannin jäätikkö sulaa niin nopeasti.

Varsinaisia havaintoja Pohjois-Atlantin kiertoliikkeen voimakkuudesta ja sen muutoksista on hyvin vähän. Meren virtauskenttää voidaan kuitenkin epäsuorasti arvioida lämpötila- ja suolaisuushavaintojen perusteella. Valitettavasti näitä mittauksia ei ole suoritettu riittävästi kattavan analyysin tekemiseen.

Brydenin et al. (2005) tutkimuksen mukaan 25. leveyspiirillä pohjoisesta etelään suuntautuvat syvän veden virtaukset ovat heikentyneet vuosien 1957 ja 2004 väli-

senä aikana. Kuitenkin myöhemmissä tutkimuksissa (esim. Cunningham, 2007) heidän johtopäätöksensä heikkenemisestä on todettu vääräksi ja on osoitettu, että kyse on luonnollisesta vaihtelusta tuolla ajanjaksolla.

Uusimpien mallisimulointien perusteella näyttää hyvin todennäköiseltä, että Atlantin valtameren meridionaalinen kiertoliike (johon liittyvät Pohjois-Atlantin lämpimät merivirrat, mm. Golf-virta) heikkenisi tämän vuosisadan aikana. A1B-skenaarioon perustuvissa malliajoissa virtaus heikkenisi vuoteen 2100 mennessä keskimäärin 25 % (eri mallikokeissa arviot vaihtelevat 0–50% välillä). Tällaisesta merivirtojen heikkenemisestä huolimatta lämpötilojen ennustetaan hieman nousevan Pohjois-Atlantin alueellakin, koska suoraan kasvihuonekaasujen lisääntymisestä johtuva lämpeneminen on niin voimakasta. IPCC:n neljännen arviointiraportin mukaan on hyvin epätodennäköistä (todennäköisyys alle 10 %), että Atlantin valtameren kiertoliikkeessä esiintyisi äkillisiä voimakkaita muutoksia ennen vuotta 2100.

Mallisimulaatioissa (Rahmstorf, 2006), joissa Pohjois-Atlantin termohaliininen kiertoliike on pysäytetty, pohjoinen pallonpuolisko kylmenee ja eteläinen lämpenee. Tämä muutos siirtää termistä päiväntasaajaa ja trooppista konvergenssivyöhykettä sateineen etelään päin.

Mikolajewicz et al. (2007) simuloivat ihmisten toiminnan aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen pitkäaikaisia vaikutuksia mallilla, jossa oli yhdistetty ilmakehämalli, merimalli, kolmiulotteinen jäätikkömalli, meribiogeokemiallinen malli sekä dynaaminen kasvillisuusmalli. Mallia ajettiin vuosille 1751–3000 B1-, A1B- ja A2-päästöskenaarioilla. Mallisimulaatioiden perusteella tämän vuosituhannen loppuun mentäessä ilmakehän hiilidioksidipitoisuus kohoaa (416, 665 ja 1 416 ppm:een). Simulaatioissa maailmanlaajuinen lämpeneminen näissä kolmessa skenaariossa on vuosituhannen loppuun mentäessä 1,3; 3,0 ja 4,9 astetta esiteolliseen aikaan verrattuna. Kuluva vuosituhannen loppuun mennessä Pohjois-Atlantin termohaliininen kiertoliike näyttää ainakin tilapäistä heikkenemistä kaikkien kolmen eri päästöskenaariossa. A2-skenaariossa (suuret päästöt) mallisimulaatioissa Pohjois-Atlantin termohaliininen kiertoliike pysähtyy kokonaan. A1B-skenaariossa mallisimulaatioissa Pohjois-Atlantin termohaliininen kiertoliike pysähtyy kolmessa viidestä malliajosta kuluva vuosituhannen loppuun mentäessä. Niissä simulaatioissa, joissa kiertoliike heikkeni, muttei pysähtynyt, lämpeneminen oli samankaltaista kuin suurimmassa osassa muilla malleilla tehtyjä simulaatioita (lämpeneminen on voimakkaampaa maa-alueilla kuin merellä, voimakkain lämpeneminen korkeilla leveysasteilla, kohtalainen lämpeneminen Pohjois-Atlantin pohjoisosassa ja Eteläisellä Jäämerellä), kun taas niissä simulaatioissa, joissa kiertoliike pysähtyi, johti se merkittävään viilenemiseen Pohjois-Atlantilla ja osassa Luoteis-Euroopan rannikkoa. Vii-

leneminen Pohjois-Atlantilla vähensi mallisimulaatioissa radikaalisti Grönlannin mannerjään sulamista.

Termohaliini kierron pysäyttäminen mallisimulaatioissa vaikuttaa myös merenpinnan korkeuteen. Meren pintavirtaukset ja merenpinnan kaltevuus ovat tasapainossa, ja muutokset pintavirtauksissa johtaisivat nopeasti muutoksiin myös merenpinnan topografiassa. Johtuen syvän veden muodostumisesta Pohjois-Atlantilla merenpinta on tällä hetkellä Pohjois-Atlantilla lähes metrin alempana kuin vastaavassa paikassa pohjoisella Tyynellä valtamerellä. Jos Pohjois-Atlantilla syvän veden muodostuminen lakkaisi, ja pintavirtaukset sen takia muuttuisivat, johtaisi se Pohjois-Atlantin alueella nopeaan ja paikoin jopa metrin suuruiseen merenpinnan nousuun. Eteläisellä pallonpuoliskolla ja etenkin Eteläisellä jäämerellä merenpinta vastaavasti laskisi, ja maailmanlaajuinen keskiarvo merenpinnan korkeuden muutokselle olisi nolla. (Levermann et al., 2005).

Muita mahdollisia termohaliinisen kiertoliikkeen pysähtymisestä seuraavia vaikutuksia ovat Alcamon et al. (2007) mukaan:

- Etelä-Euroopassa veden valunnan väheneminen ja saatavuuden huononeminen
- Länsi-Euroopassa lumen sulamisvesien aiheuttamat tulvien lisääntyminen
- satojen huononeminen
- muutoksia Länsi-Euroopan ja Välimeren alueen ekosysteemeissä (esim. luonnon monimuotoisuudessa, ruoan tuotannossa ja metsätaloudessa)
- pohjoisten satamien ja merien jääajan pidentyminen

Lisäksi termohaliinisen kiertoliikkeen huomattavalla heikkenemisellä tai täydellisellä pysähtymisellä olisi vakavia vaikutuksia meriekosysteemeihin ja sitä kautta myös arktisiin kulttuureihin ja elinkeinoihin. Kiertoliikkeen täydellinen pysähtyminen on kuitenkin ainakin lähimmässä tulevaisuudessa epätodennäköistä.

### 3.5 Maaekosysteemin muutokset

Ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kasvaessa yhteyttämisen ennustetaan aluksi voimistuvan ja kasvillisuuden (maa-alueiden biosfäärin) toimivan hiilen nettonieluna ja maaperän hiilivarojen kasvavan. Yhteyttämisen lisäksi kuitenkin myös kasvijäännösten lahoaminen ja soluhengitys lisääntyvät lämpötilan kohotessa ja sadannan lisääntyessä, eikä enää ole varmaa, että kasvillisuus toimii hiilen nettonieluna. Eräiden mallisimulaatioiden mukaan jo vuonna 2050 (Cox et al., 2000) maa-alueet muuttuisivat hiilen nettolähteiksi, kun soluhengitys ja hajoaminen vapauttavat enemmän

hiiltä kuin yhteyttäminen sitoo. Tästä seuraa ilmaston lämpenemistä voimistava palauteilmiö, kun hiilidioksidin pitoisuus ilmakehässä lisääntyy. Tämä ilmaston lämpenemistä voimistava palauteilmiö näkyy eri mallisimulaatioissa, mutta ilmiön suuruudesta ei ole varmuutta. (Friedlingstein et al., 2006).

Maaekosysteemeissä tapahtuvia muutoksia ei pystytä täydellisesti ennustamaan millään mallilla. Ennustaminen on vaikeaa, koska ennalta ei tiedetä, miten maankäyttö muuttuu (metsää raivataan pelloksi tms.). Toinen ennusteita vaikeuttava ilmiö on kasvien sopeutuminen. Alaskan arktisten tundra-alueiden uskottiin 1990-luvulla muuttuneen ilmaston lämpenemisen ja kuivumisen myötä hiilidioksidin nettolähteeksi (Oechel et al., 1993). Myöhemmin Oechel et al. (2000) kuitenkin totesivat kasvien sopeutuneen muuttuneisiin olosuhteisiin, alueiden vihertyneen ja muuttuneen kesäisin hiilidioksidin nieluksi.

### 3.5.1 Amazonin sademetsä

Amazonian alueen arvioidaan sisältävän noin 10 % maailman maaekosysteemeihin sitoutuneesta hiilestä ja vastaavan noin 10 % maapallon hiilinielusta (Melillo, 1993). Amazonin sademetsää uhkaavat ilmastonmuutos ja hakkuut sekä muut maankäytön muutokset Amazonin alueella. Kirjallisuudessa ei ole yhtenevää mielipidettä siitä miten Etelä-Amerikan ilmasto tulee kasvihuoneilmiön voimistumisen myötä muuttumaan. Lentonin et al. (2008) arvion mukaan maapallon keskilämpötilan kohoaminen noin 3 asteella voisi aiheuttaa laajaa Amazonin sademetsän häviämistä. Cookin ja Vizyn (2008) mallisimulaation mukaan nostettaessa ilmakehän hiilidioksidipitoisuus kaksinkertaiseksi verrattuna nykytasoon, kuluvan vuosisadan loppuun tultaessa Amazonin sademetsästä jopa 70 % olisi muuttunut savanniksi tai caatinga-metsäksi. Sademetsän tuhoutumisen aiheuttaisivat sadannan muutokset eli kuivan kauden piteneminen ja kokonaissademäärien väheneminen.

### 3.5.2 Havumetsävyöhykkeen metsät

Havumetsävyöhykkeen metsille ominaisia ovat monimutkaiset vuorovaikutusmekanismit puiden fysiologian, maaperän koostumuksen, roudan sekä metsäpalojen välillä. Pahimmillaan ilmastonmuutoksen seurauksena kohonneet lämpötilat sekä kesäiset kuivuusjaksot yhdistyneenä lisääntyviin metsäpaloihin, tuholaisiin ja kasvitauteihin voisivat aiheuttaa havumetsien häviämisen laajoilta alueilta. On esitetty arvioita, joiden mukaan maapallon keskilämpötilan kohoaminen noin 3 asteella voisi aiheuttaa laajaa havumetsien häviämistä lähinnä manneralueiden sisäosissa. Toisaalta on tutkimuksia, joiden mukaan lisääntyvä hiilidioksidipitoisuus ja pitempi kasvukausi edistävät metsien kasvua.

Piaon et al. (2008) tutkimusten mukaan lämpimät syksyt lisäävät pohjoisissa maa-ekosysteemeissä sekä yhteyttämistä että soluhengitystä, ja näistä soluhengityksen lisääntyminen on voimakkaampaa. Sitä vastoin keväisin lämpeneminen voimistaa yhteyttämistä enemmän kuin soluhengitystä. Havaintojen ja simulaatioiden mukaan pohjoisten maa-alueiden ekosysteemien syksyisin voimistunut soluhengitys vapauttaa ilmakehään tätä nykyä 90 % keväällä voimistuneen yhteyttämisen sitomasta hiilidioksidista. Vesalan (2008) alustavien tutkimustulosten mukaan keskimääräistä korkeampi lämpötila syksyllä lisäsi merkittävästi boreaalisen havumetsän ekosysteemin soluhengitystä Etelä-Suomen Hyytiälässä. Keskimääräistä lauhempana syksynä (1.9.–31.12.2006) boreaalinen havumetsä vapautti voimistuneen soluhengityksen ja hajoamisen takia 50 % enemmän hiilidioksidia kuin vertailuajanjakson (1996–2005) aikana.

### 3.6 Ikiroudan sulaminen

Maapallon ikiroutaan on sitoutuneena suuret määrät hiiltä. Ikiroutakerroksen pintaosien arvioidaan sisältävän enemmän orgaanista hiiltä kuin nykyään on ilmakehässä. Tutkimusten mukaan lähes kaikkialla pohjoisten alueiden ikiroutakerroksen pintaosissa lämpötila on viimeisten 20–30 vuoden aikana kohonnut, ja paikoin lämpötila on noussut jopa kolme astetta. Osan vuotta routaantuvan alueen laajuus on 1900-luvun alun jälkeen vähentynyt pohjoisella pallonpuoliskolla 7 %; keväisin jäätynyttä maa-aluetta on jopa 15 % entistä vähemmän. Ikiroudan sulaminen nopeuttaisi ikiroudassa aikaisemmin jäätyneenä olleen orgaanisen aineen hajoamista ja vapauttaisi ilmakehään suuria määriä kasvihuonekaasuja, mikä edelleen voimistaisi kasvihuoneilmiötä.

Ilmaston lämpeneminen tällä vuosisadalla näyttää tutkimusten mukaan kiihdyttävän ikiroudan sulamista molempien pallonpuoliskojen subarktisella alueella sekä vuoris-  
toissa. Ikiroudan vähenemiseen ei kuitenkaan vaikuttaisi liittyvän käännepisteilmiötä (Lenton et al., 2008). Lawrence et al. (2005) laskivat ilmastomallilla lähelle pintaa ulottuvan ikiroudan pinta-alan kehitystä (pois lukien mannerjäätiköt) kuluvaan vuosisadan aikana B1- ja A2-päästöskenaarioissa. Simulaatioiden mukaan vuonna 2100 B1-skenaariossa enää 40 % (A2-skenaariossa enää 10 %) nykyisestä pinnan lähelle ulottuvasta ikiroudasta on jäljellä.

### 3.7 El Niño -ilmiöissä tapahtuvat muutokset

Pintaveden lämpötila Tyynenmeren päiväntasaajan tienoilla on epätasaisesti jakautunut. Indonesian paikkeilla vesi on keskimäärin 30-asteista, Perun rannikon tuntumassa vain 20–25-asteista. Veden lämpötila vaihtelee vuodesta toiseen etenkin Tyynenmeren itäisellä puoliskolla, missä vesi lämpenee epäsäännöllisissä muutaman vuoden välein toistuvissa El Niño -tilanteissa 1–3 astetta normaalia lämpimämmäksi, Perun rannikolla joskus enemmänkin. El Niño -vuosien välissä on La Niña -vuosia, jolloin Tyynenmeren itäosat ovat tavallisia viileämpiä. Näillä vaihteluilla on suuri vaikutus trooppisen Tyynenmeren sääoloihin. Keskimääräistilanteessa ja La Niña -vaiheessa suurimmat sateet saadaan Indonesian tienoilla, missä vesi on lämpimintä. Etelä-Amerikan länsirannikolla sen sijaan on tuolloin hyvin kuivaa. El Niño -vuosina Tyynenmeren itäosassa ja Perussa sataa rankasti ja Indonesiassa ja Australiassa on tavallista kuivempaa. El Niño – La Niña -vaihteluun liittyy myös muualla tropiikissa ja jossain määrin myös korkeammilla leveysasteilla tuntuvia säänmuutoksia.

Useimmissa ilmastomalleissa (IPCC, 2007a) keskimääräinen lämpötila nousee hiukan enemmän Tyynenmeren itä- kuin länsiosassa, eli tulevat keskimääräisolot muistuttavat enemmän El Niño- kuin La Niña -tilannetta. Tämän muuttuneen keskimääräistilan ympärillä esiintyy edelleen myös vuosivälisestä El Niño- La Niña -vaihtelua. Muutokset El Niño- La Niña -vaihtelun amplitudissa ja esiintymistiheydessä kuitenkin vaihtelevat mallista toiseen.

### 3.8 Muutokset Etelä-Aasian kesämonsuunissa

Ilmanpaine-ero mantereen ja Intian valtameren välillä synnyttää monsuunikiertoliikkeen. Kiertoliikettä edelleen voimistaa mereltä monsuunin mukana mantereelle siirtyvä kosteus. Monsuunin heikkeneminen vaatisi kiertoliikkeen synnyttävän ilmanpaine-eron pienenemisen. Ilmaston lämpeneminen kuitenkin lisää lämpötila- ja myös ilmanpaine-eroa mantereen ja meren välillä ja voimistaa monsuunikiertoliikettä. Vastakkaiseen suuntaan vaikuttaa ilman pienhiukkasten lisääntyminen sekä maanpinnan heijastuskyvyn lisääntyminen. Pienhiukkasten lisääntyessä ilmakehässä tai pinnan heijastuvuuden suurentuessa esimerkiksi maankäytön muutosten seurauksena maanpinta lämpenisi nykyistä vähemmän, ja tämä voisi heikentää monsuunikiertoliikettä. Monsuunikiertoliikkeen tapauksessa lämpeneminen siis voimistaa monsuunia, mutta esimerkiksi ihmisten toimesta tapahtuva maanpinnan heijastuskyvyn lisääntyminen sekä ilmakehään joutuvien pienhiukkasten kuten sulfaattiaerosolien lisääntyminen heikentävät kiertoliikettä. Lisäksi esimerkiksi maanviljelyn kannalta oleellisia kysymyksiä ovat monsuunin ajoittuminen ja sen säännöllisyys, jotka voivat muuttua

vaikkei itse ilmiössä tapahdu peruuttamatonta muutosta. Aihe vaatii jatkotutkimuksia.

### 3.9 Sahara/Sahel ja Länsi-Afrikan monsuuni

Viime jääkauden päätyttyä noin 10 000 vuotta sitten Sahara oli vuosituhansien ajan selvästi nykyistä vihreämpi. Näihin aikoihin maapallon kiertorata oli sellainen, että auringonsäteilyä tuli kesällä pohjoiselle pallonpuoliskolle nykyistä enemmän. Pohjois-Afrikkaa lämmittänyt auringonsäteily voimisti Länsi-Afrikan monsuunia, jonka tuomat sateet ylsivät tuolloin nykyistä pitemmälle sisämaahan. Osaltaan myös runsaampi kasvillisuus itsessään piti ilmastoa nykyistä kosteampana. Auringonsäteilyn myöhemmin vähetessä monsuuni heikkeni. Kasvillisuus hävisi ilmeisesti melko äkillisesti noin 5 000 vuotta sitten.

Jos tuleva kasvihuoneilmiön voimistuminen vaikuttaisi samoin kuin Pohjois-Afrikan kesällä saaman auringonsäteilyn lisääntyminen jääkauden jälkeen, Saharan ja sen eteläpuolisen Sahelin alueen ilmaston voisi odottaa muuttuvan nykyistä kosteammaksi. Näin ei kuitenkaan välttämättä käy, vaan eri mallikeskusten maapallon laajuisilla maa-meri-ilmastomalleilla tehtyjen simulaatioiden tulokset Länsi-Afrikan monsuunin käyttäytymisestä lämmenneessä ilmastossa poikkeavat toisistaan. Joidenkin mallitulosten mukaan sademäärät Sahelin alueella voisivat lisääntyä läntisten ilmapvirtausten voimistuessa. Toisaalta on mallituloksia, joiden mukaan poikkeuksellisen kuivien jaksojen todennäköisyys voisi myös kasvaa.

### 3.10 Merenpohjan metaaniklatraatit

Metaaniklatraatti (toiselta nimeltään metaanihydraatti) on jään kaltainen yhdiste, jossa on metaania vangittuna vesimolekyylien muodostaman kiderakenteen sisälle. Metaaniklatraatit ovat stabiileja riittävän alhaisessa lämpötilassa ja suuressa paineessa, kuten yli 250 metrin syvyydellä merenpinnan alapuolella. Metaaniklatraattien sulamislämpötila on kovassa paineessa tavallisen jään sulamispistettä korkeampi.

Metaaniklatraatteja on kertynyt eloperäisen aineen hapettoman hajoamisen seurauksena mm. merten pohjille, missä hiiltä niihin sitoutuneena arvioidaan olevan enemmän kuin kaikissa tunnetuissa fossiilisten polttoaineiden esiintymisissä. Esiintymien yläpuolisen meriveden lämpötilan kohotessa osan metaaniklatraateista oletetaan sulavan ja vapauttavan sisältämänsä metaanin veteen. Osa vapautuneesta

metaanista pääsisi ilmakehään ja hapettuisi edelleen hiilidioksidiksi. Tämä kohottaisi ilmakehän hiilidioksidi- ja metaanipitoisuutta ja voimistaisi kasvihuoneilmiötä.

Katzin et al. (1999) sekä Bernesin (2003) mukaan noin 55 miljoonaa vuotta sitten merten metaaniklatraatiivarastoista näyttää jostain syystä vapautuneen valtavasti metaania muutamassa vuosituhanessa. Maapallon keskilämpötila näyttää tuolloin nousseen äkillisesti 5–7 astetta, ja ilmaston palautuminen entiselleen kesti 100–150 tuhatta vuotta.

Nykykäsityksen mukaan merten pohjien lämpeneminen ja siitä aiheutuva metaaniklatraattien vapautuminen on hidas prosessi, sillä lämmön tunkeutuminen pohjasedimentteihin vie aikaa. Fyken ja Weaverin (2006) mallisimulaatioiden perusteella jo vuonna 2050 malleissa havaitaan metaaniklatraattien vapautumista korkeiden leveysasteiden matalissa merenpohjissa, alueilla joilla merijää vähenee, esim. Ohotanmerellä ja Beringinmerellä. Heidän laskelmiensa mukaan merkittäviä määriä metaania vapautuisi tulevaisuuden lämmenneessä ilmastossa, todennäköisesti kuitenkin vasta tuhansien vuosien aikaskaalassa.



## 4 MUUTOKSIEN VAIKUTUKSET LUONTOON JA YHTEISKUNTIIN

Ilmastonmuutoksen yhteiskunnallisia vaikutuksia on viime vuosina tutkittu paljon. Epälineaaristen ja äärimmäisten ilmaston muutosten vaikutusten arvioiminen on jäänyt kuitenkin huomattavasti pienemmälle huomiolle, rajoittuen lähinnä muutama yksittäiseen tutkimukseen eri ilmiön vaikutuksista. Epälineaaristen ilmaston muutosten vaikutuksia luontoon ja yhteiskuntaan voidaan mallintaa kolmella tavalla. Ensimmäinen menetelmä on käyttää numeerisia simulointimalleja potentiaalisista ilmaston muutoksista. Tällöin ongelma on kuitenkin se, että epälineaarista ilmaston muutoksista ei ole skenaarioita, joita simuloinneissa voitaisiin numeerisesti mallintaa. Toinen menetelmä on tarkastella aiemmin tapahtuneiden ilmaston muutosten, kuten pikku jääkauden, vaikutuksia. Näiden aiempien, kauan sitten tapahtuneiden muutosten vaikutusten ei kuitenkaan voida ajatella analogisesti olevan siirrettävissä nykyolosuhteisiin. Epälineaaristen ilmaston muutosten vaikutukset riippuvat suuresti kyseessä olevan kansantalouden ja yhteiskunnan ominaisuuksista, eikä aiempien ilmaston muutosten vaikutuksia voida siten yleistää nykytilanteeseen. Kolmas menetelmä arvioida vaikutuksia on mallintaa ilmiötä ja vaikutuksia alan asiantuntijoiden mielipiteiden avulla. Ainoastaan toista tapaa on käytetty laajemmassa mittakaavassa, ja kahta muuta hyvin vähän (Arnell ym., 2005).

Taulukossa 1 käsitellyillä äärimmäisillä ja epälineaarilla ilmaston muutoksilla on monenlaisia vaikutuksia yhteiskuntiin ja ekosysteemeihin. Näitä vaikutuksia on osittain käsitelty taulukoissa TS3 ja TS4 (liite 4) (jotka ovat IPCC:n neljännen arviointiraportin 2-osan teknillisessä yhteenvedossa). Taulukoissa on esimerkkejä ilmastonmuutoksen sekä merenpinnan muutoksen ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden aiheuttamista maailmanlaajuisista (taulukko TS3) ja paikallisista (taulukko TS4) vaikutuksista yhdistettynä erisuuruisiin pintalämpötilan muutoksiin kuluvan vuosisadan aikana.

### 4.1 Pohjoisen jäämeren jääpeitteen sulaminen

Arktisella alueella jäätiköiden sulaminen aiheuttaa sekä positiivisia että negatiivisia vaikutuksia. Merijään sulaminen vaikuttaa merkittäväällä tavalla sitä ympäröiviin ja siitä suoraan riippuvaisiin yhteiskuntiin ja eliölajeihin. Jäämassojen sulaminen avaa uusia merireittejä, joille on monia halukkaita käyttäjiä, kuten kaupalliset kalastusalukset, alkuperäiskansat, turistit sekä muut laivastot. Tämä voi aiheuttaa ongelmia eri käyttäjäryhmien kesken, ja jopa poliittiset konfliktit eri ryhmien ja maiden

välillä ovat mahdollisia. Esimerkiksi Norjan ja Venäjän välillä on aivan viime vuosina ollut kalastusaluksiin liittyviä konflikteja, joten konfliktien mahdollisuus on todellinen. Lisäksi uusien reittien avaaminen vaikeilla alueilla vaatii huomattavaa kansainvälistä panostusta meriturvallisuuteen ja ympäristön suojeluun. Vaikeiden reittien avautuminen lisää esimerkiksi suurten öljyonnettomuuksien riskiä huomattavasti (Hassol, 2004).

Sadat miljoonat muuttolinnut lentävät päiväntasaajan alueelta kesäksi arktisille alueille. Lintujen elintärkeät pesimis- ja lisääntymisalueet sekä muutonaikaiset levähdysalueet muuttuvat, jolloin niiden elintila vähenee. Pohjoisen jäämeren jääpeitteen sulaminen ja siitä aiheutuva ekosysteemien muuttuminen vaikuttavat myös moniin jäädästä riippuvaisiin eläinlajeihin. Jäädästä riippuvaisia eläinlajeja ovat esimerkiksi jääkarhut, hylkeet ja mursut. Ekosysteemien muutoksesta ja jään vähenemisestä aiheutuu myös inhimillisiä vaikutuksia. Alkuperäiskansojen harjoittama metsästyks vaikeutuu jään vähetessä ja riistaeläinten elinalueiden muuttuessa. Arktisilla alueilla meriveden nousu ja myrskyt aiheuttavat myös vakavia eroosio-ongelmia, jotka vaikuttavat sekä alueen asutukseen että elinkeinoihin, esimerkiksi öljyvarastoihin (Hassol, 2004).

## 4.2 Ikiroudan tilavuuden pieneneminen

Siinä missä merijään sulaminen mahdollistaa uusien merireittien avaamisen, ikiroudan sulaminen ja maaperän kantavuuden heikentyminen vaikeuttavat maakuljetusten järjestämistä huomattavasti. Alueet, joissa maa on ikiroudassa, ovat usein paremmin saavutettavissa talvella, kun tundra on jäässä. Monien arktisilta alueilta saatavien luonnonvarojen, kuten puun ja öljyn kuljetus, tapahtuu maata pitkin, joten ikiroudan alueen pieneneminen vaikeuttaa luonnonvarojen poiskuljetusta. Esimerkiksi Alaskassa niiden päivien lukumäärä, jolloin tundralle on mahdollista mennä etsimään ja poraamaan öljyä ja maakaasua, on viimeisten 30 vuoden aikana vähentynyt puoleen (Hassol, 2004). Vuoristoalueilla ikiroudan sulaminen epävakauttaa rinteitä ja lisää maanvyöryjen riskiä.

## 4.3 Boreaalisten metsien väheneminen

Borealiset metsät ovat merkittävä tulonlähde arktisille maille, ja muutokset puun määrässä vaikuttavat suoraan maiden bruttokansantuotteeseen. Borealiset metsät vaikuttavat myös veden kiertokulkuun kyseisillä alueilla, ja lisäksi ne tarjoavat

elinympäristön monille paikallisella tasolla taloudellisesti merkittävälle eläinlajeille (Hassol, 2004).

#### 4.4 Mannerjäätikön sulaminen

Mannerjäätiköiden sulamisesta aiheutuvalla meriveden huomattavalla pinnannousulla on erittäin vakavia taloudellisia seurauksia merenrannoilla ja saarilla asuville. Viiden metrin merenpinnan nousu vaikuttaisi pahimmillaan noin 270 miljoonaa ihmiseen (laskettuna nykyisestä väestöstä) ja vaikutukset bruttokansantuotteeseen voivat pahimmillaan olla noin 2000 mrd. US\$. Herkimmät alueet meriveden pinnannousulle ovat Itä- ja Etelä-Aasia. Tällä on suuri vaikutus näiden alueiden yhteiskuntaan, sillä iso osa Kaakkois-Aasian väestöstä on sijoittunut alaville suistoalueille. Taloudellisesti suurimmat vaikutukset 5 metrin meriveden pinnan nousulla ovat Itä-Aasiassa (noin 700 mrd. US\$), Pohjois-Amerikassa (noin mrd. 500 US\$), Euroopassa (noin 470 mrd. US\$) ja Etelä-Aasiassa (noin 280 mrd. US\$). Muilla alueilla taloudelliset vaikutukset ovat huomattavasti pienemmät, vaihdellen 5–100 miljardin US\$ välillä (Anthoff et al., 2006). Näissä arvioissa ei ole otettu huomioon yhteiskuntien mahdollisia suojelutoimia. Useat suuret kaupungit, kuten Tokio, Mumbai, Pietari, New York ja Lontoo vaativat rannikoiden suojelua (Stern, 2006). Rannikoiden suojelun kannattavuutta on tarkasteltu paljon. Erään tutkimuksen mukaan lähes kaikkia OECD-maiden kaupungeista ja satamista on taloudellisesti kannattavaa suojella. Sen sijaan rantojen ja avoimien rannikoiden suojelun taloudellinen kannattavuus vaihteli 50 ja 80 % välillä (Fankhauser, 1995).

Erityisen herkkiä meriveden pinnan nousulle ja muille äärimmäisille ilmiöille ovat pienet saarivaltiot. Tämä johtuu niiden pienestä koosta ja siitä, että niiden sopeutumiskyky erilaisille ääri-ilmiöille on alhainen. Sopeutumiskustannukset ovat myös erittäin suuri osa näiden alueiden bruttokansantuotteesta. Meriveden pinnan nousu lisää esimerkiksi tulvimista, suuria aaltoja ja eroosiota. Saarilla suuri osa elintärkeästä infrastruktuurista sijaitsee rannikoilla, joten meriveden pinnannousu uhkaa pienten saarten elinvoimaisuutta erittäin suuresti. Esimerkiksi Karibian ja Tyynenmeren saarilla puolet ihmisistä elää alle 1,5 kilometrin päässä rantaviivasta. Lisäksi lähes kaikki lentokentät, satamat ja maantiet sijaitsevat rannikolla (IPCC, 2007b).

## 4.5 Kuivuus

Äärimmäiset ilmaston muutokset vaikuttavat makean veden määrään ja jakautumiseen. Kuivuuden merkittävin vaikutus on maataloustuotannon heikentyminen. Taulukon TS3 mukaan lähellä päiväntasaajaa sijaitsevilla alueilla kaikkien viljakasvien tuottavuus heikkenee. Tällä on merkittäviä vaikutuksia erityisesti jo valmiiksi köyhempien alueiden yhteiskuntiin. Esimerkiksi Aasiassa jo melko pienilläkin lämpötilojen nousuilla arvioidaan olevan merkittäviä vaikutuksia vehnän, maissin ja riisin satoihin. Tämä vaikuttaa suoraan ihmisten ravinnonsaantiin. Vaikutukset vähemmän kehittyneissä maissa ovat merkittäviä, koska maataloussektori muodostaa suuren osan maiden bruttokansantuotteesta. Lisäksi taulukoista TS3 ja TS4 nähdään, että makean veden saatavuus heikkenee kuivilla alueilla johtaen mm. siihen, että entistä suuremmalla määrällä ihmisiä ei ole riittävästi juomavettä. Maapallon keskilämpötilan yli kolmen asteen nousun jälkeen makean veden puutteessa eläviä ihmisiä voi olla 3,2 miljardia.

Amazonin sademetsän osittainen kuivuminen vähentää alueella saatavia sateita. Etelä-Amerikassa tällä hetkellä noin 14 %:lla ihmisistä ei ole riittävästi puhdasta vettä tarjolla. Näistä ihmisistä 63 % asuu maaseudulla. Useat yhteiskunnat saavat makean vetensä suoraan sadevedestä, jolloin sadeveden väheneminen luonnollisesti vaikeuttaa veden saantia.

Etelä-Aasiassa sademäärien mahdollinen vähentyminen ja siitä aiheutuva kuivuus aiheuttavat erittäin vakavia taloudellisia seurauksia. Tästä on saatu jo esimerkkejä. Esimerkiksi Intiassa vuonna 2002 monsuunisateet olivat 19 % normaalia pienemmät, mikä alensi Intian bruttokansantuotetta 3 % (Stern, 2006).

## 5 JATKOTUTKIMUSTARPEET

Äärimmäisiin ja epälineaaristen ilmaston muutosten ennustamiseen liittyy paljon epävarmuutta. Tämän epävarmuuden pienentäminen vaatii sekä havaintoihin perustuvaa tutkimusta, lisää mallisimulaatioita hypoteesien testaamiseksi ja todennäköisyysarvioiden pohjaksi, mallitulosten ja havaintoaineiston keskinäistä vertailua että jo olemassa olevien mallien tarkentamista. Tämän tutkimuksen tulee kattaa ilmastojärjestelmän nykyisen ja tulevan toiminnan lisäksi myös sen menneisyys, jotta voitaisiin paremmin ymmärtää aiemmin tapahtuneita äkillisiä muutoksia ja niiden syitä.

Mallittamisessa keskeisiä asioita on ilmakehämallien tarkentaminen ja yhdistettyjen mallien (ilmakehä-, valtameri-, biosfääri-, kemia- ym.) kehittäminen. Esimerkiksi arktisella alueella tapahtuvat muutokset ovat osin herkkiä ilmakehän ja valtamerien kiertoliikkeen muutoksille, joiden ennustaminen on vielä vaikeaa. Samaten trooppisten sademetsien tulevaisuus riippuu paljon tropiikin sadeolojen muutoksista. Sadeennusteiden tarkentaminen vaatii pilviprosessien nykyistä yksityiskohtaisempaa kuvaamista malleissa.

Mannerjäätiköiden mallittamisessa taas on vielä lukuisia avoimia kysymyksiä, liittyen etenkin niihin pienen mittakaavan ilmiöihin, jotka näyttävät kiihdyttäneen Grönlandin ja Etelämantereen reunajäätiköiden sulamista viime aikoina.

Hiilen kiertokulkuun liittyvien muutosten luotettavampi simulointi puolestaan edellyttää maa- ja meribiosfääriin (esim. sademetsien, ikiroudan sekä sulan maaperän orgaanisen aineksen reagoimisen ilmaston muutoksiin) mallien parantamista. Tuekseen mallit vaativat havaintoja sekä ilmakehästä (esim. trooppisen pilvisyyden reagointi kasvillisuuden muutoksiin), jäätiköiltä, valtameristä (virtausolojen nykyistä tarkempi seuranta) että biosfääristä (esim. kasvihuonekaasujen vuomittaukset eri puolilla maapalloa). Suomessa on hyvää osaamista mm. soiden ja metsien hiilitaseeseen liittyvien ilmiöistä (prosesseista, vuorovaikutuksista ja palautusilmiöistä).

Menneisyyden ilmastoa koskevassa tutkimuksessa on keskeistä olemassa olevan ja uuden epäsuoran ilmastotiedon vertaaminen mallien tuloksiin, jotta saataisiin nykyistä parempi käsitys aiemmin tapahtuneiden nopeiden ilmaston muutosten mekanismeista ja siitä, ovatko samanlaiset muutokset mahdollisia nykyisessä ilmastossa.

Suomi sijaitsee alueella, jossa lämpenemisen arvioidaan olevan selvästi globaalikeskiarvoa voimakkaampaa. Suomen kannalta on tärkeää luoda hyvät valmiudet tulkita maailmanlaajuisista ilmastomalleista saatavat tiedot huomioiden paikalliset erityisolosuhteemme ja tarkentaa ilmastomuutoksen vaikutukset alueelliselle ja paikalliselle tasolle. Tähän käytetään alueellisia ilmastomalleja. Tarvitsemme tietoa siitä, kuinka esimerkiksi Pohjoisen Jäämeren lämpö- ja jääoloissa tapahtuvat muutokset tai Pohjois-Atlantin termohaliinisen kiertoliikkeen heikkeneminen vaikuttavat Pohjois-Atlantilta saapuvien myrskyjen reitteihin sekä voimakkuuksiin. Haavoittuvan ympäristömme kannalta tärkeitä tutkimuskohteita ovat esimerkiksi metsien, soiden ja vesistöjen energia-, vesi- pienhiukkas- ja kaasutaseet muuttuvassa ilmastossa

## 6 YHTEENVETO

Ihmisten toiminnan aiheuttamasta ilmaston lämpenemisestä seuraa palauteilmiöitä, joilla voi olla lämpenemistä hillitsevä tai voimistava vaikutus. Voimakkaat palauteilmiöt voivat aiheuttaa äärimmäisiä ilmaston muutoksia. Epälineaarisisessa ilmaston muutoksessa ilmastosysteemi ajautuu jonkin kynnsarvon, käänne pisteen (engl. tipping point) yli, ja tämän käänne pisteen ylittäminen käynnistää ulkoista pakotetta suuremman, epälineaarisen muutoksen. Esimerkkejä mahdollisista epälineaarisisista ilmaston muutoksista ovat Pohjoisen jäämeren merijään sulaminen kesäisin ja termohaliinisen kierto liikkeen pysähtyminen.

Ilmastonmuutosta ennustetaan ilmastomalleilla, joissa simuloidaan jonkun ulkoisen pakotteen, esimerkiksi kasvihuonekaasujen lisääntymisen vaikutusta ilmastojärjestelmään. Ilmastonmuutosennusteisiin liittyy suuria epävarmuuksia, kuten ilmaston luonnollinen vaihtelu, epävarmuus tulevaisuuden päästöissä ja mallien yksinkertaisuudet. Ekosysteemien palauteilmiöitä ennustettaessa epävarmuutta aiheuttavat lisäksi ihmisten toiminnan vaikutus ja luonnon kyky sopeutua muutokseen.

Ilmastonmuutoksen yhteiskunnallisten vaikutusten kvantitatiivinen arvioiminen on erittäin vaikeaa, ja epävarmuustekijöitä on parhaimmissakin malleissa useita. Vaikutukset ovat aina suuntaa-antavia, ja ne riippuvat monista tekijöistä. Merkittäviä tekijöitä yhteiskunnallisessa tutkimuksessa ovat aineiston laatu ja määrä sekä mallin kyky kuvata vallitsevia ja tulevia olosuhteita. Lisäksi yhteiskuntien ja eliölajien sopeutumiskykyä on usein hyvin vaikea kuvata. Erityisesti epälineaaristen ja äärimmäisten ilmaston muutosten vaikutusten arviointi on vaikeaa ja epävarmaa. Yleisellä tasolla voidaan kuitenkin sanoa, että tässä raportissa käsiteltyihin mahdollisiin äärimmäisiin ilmaston muutoksiin liittyy merkittäviä yhteiskunnallisia ja luontoa koskevia vaikutuksia, jotka eivät rajoitu muutosilmiön esiintymisalueelle vaan vaikutukset tuntuvat kokonaisen mantereen tai jopa maapallon mittakaavassa.

Seuraavassa on lyhyt yhteenveto tässä raportissa käsitellyistä mahdollisista äärimmäisistä ilmaston muutoksista ja niiden vaikutuksista. Suuri osa äärimmäisistä ilmaston muutoksista on erittäin epätodennäköisiä, jos EU onnistuu tavoitteessaan rajoittaa maapallon keskilämpötilan nousu 2 asteeseen verrattuna esiteolliseen aikaan (noin 1,2 asteeseen nykyisestä). Viimeaikaiset havainnot – joiden mukaan keskilämpötilan osalta liikutaan ennusteiden ylärajalla ja päästöjen ja merenpinnan nousun ennusteet ovat olleet aliarvioita – antavat kuitenkin aiheetta pitää myös äärimmäisiä ilmaston muutoksia mahdollisina.

**Merijää** reagoi herkästi ilmaston lämpenemiseen. Kaikki SRES-skenaarioihin perustuvat mallilaskelmat ennustavat merijään pinta-alan pienenevän sekä pohjoisilla että eteläisillä napa-alueilla. Tämän vuosisadan loppupuolella Pohjoisen jäämeren jääpeite katoaa monissa mallisimulaatioissa kesäisin lähes kokonaan. Jään viimeaikainen, ennustettua nopeampi väheneminen on herättänyt epäilyksiä, että kesäisin jäättömään tilanteeseen päädyttäisiin jo muutaman vuosikymmenen kuluttua. Jäämeren kesäisen jääpeitteen häviämisen todennäköisyys noin 30–100 vuoden tähtäimellä näyttää siis olevan suuri. Eräissä mallisimulaatioissa, joissa ilmakehän hiilidioksidipitoisuus on nelinkertaistettu, myös talvinen jääpeite on lopulta hävinnyt. Mahdollisuutta, että näin kävisi tämän vuosisadan aikana, pidetään kuitenkin hyvin pienenä. Jään sulaminen avaa uusia merireittejä, mutta huonontaa jäätä riippuvaisten ihmisten ja eläinlajien kuten jääkarhujen ja hylkeiden elämää.

**Grönlannin mannerjäätikön täydellinen sulaminen** arvioidaan mahdolliseksi, jos maapallon keskilämpötila nousee 1–2 astetta nykyistä korkeammaksi. Nykyisten mallilaskelmien mukaan sulaminen veisi vuosituhansia, mutta mallien puutteiden takia nopeampaakaan sulamista ei voida sulkea pois laskuista, ja alarajaksi on esitetty 300 vuotta. Grönlannin jäätikön täydellinen sulaminen nostaisi merenpintaa noin 7 metriä. Tällaisella huomattavalla merenpinnannousulla on erittäin vakavia taloudellisia seurauksia erityisesti merenrannoilla ja saarilla asuville ihmisille.

**Länsi-Antarktiksien mannerjäätikön täydellinen sulaminen** arvioidaan mahdolliseksi, jos maapallon keskilämpötila nousee 3–5 astetta nykyistä korkeammaksi. Myös tämän jäätikön sulaminen veisi nykykäsityksen mukaan vähintään useita satoja vuosia. Länsi-Antarktiksien jäätikön täydellinen sulaminen nostaisi merenpintaa noin 5 metriä.

**Pohjois-Atlantin termohaliinisen kiertoliikkeen** heikkeneminen seuraavan sadan vuoden aikana on mallisimulaatioiden mukaan hyvin todennäköistä. Yhdessäkään mallissa kiertoliike ei kuitenkaan pysähdy kokonaan ainakaan vuoteen 2100 mennessä, vaikka joidenkin simulaatioiden mukaan se voisi pysähtyä myöhemmin. Asiantuntija-arvioiden mukaan kiertoliikkeen pysähtyminen vaatisi maapallon keskilämpötilan nousua vähintään 3–5 astetta nykyistä korkeammaksi. Tämän kynnyksarvon ylityttyä pysähtyminen saattaisi tapahtua noin vuosisadassa. Pohjois-Atlantin alueella kiertoliikkeen heikkeneminen hidastaa ilmaston lämpenemistä, muttei pysäytä sitä. Kiertoliikkeen pysähtyminen vaikuttaisi sateiden jakautumiseen Etelä- ja Länsi-Euroopassa sekä hidastaisi huomattavasti Grönlannin jäätikön sulamista.



**Havumetsävyöhykkeen metsille** ominaista ovat monimutkaiset vuorovaikutusmekanismit puiden fysiologian, maaperän koostumuksen, roudan sekä metsäpalojen välillä. Pahimmillaan ilmastonmuutoksen seurauksena kohonneet lämpötilat sekä kesäiset kuivuusjaksot yhdistyneenä lisääntyviin metsäpaloihin, tuholaisiin ja kasvitauteihin voisivat aiheuttaa havumetsien häviämisen laajoilta alueilta. On esitetty arvioita, joiden mukaan maapallon keskilämpötilan kohoaminen noin 3 asteella voisi aiheuttaa laajaa havumetsien häviämistä lähinnä manneralueiden sisäosissa. Toisaalta on tutkimuksia, joiden mukaan lisääntyvä hiilidioksidipitoisuus ja pitempi kasvukausi edistävät metsien kasvua. Mikään kasvi ei kuitenkaan pysty hyödyntämään hiilidioksidipitoisuuden kasvua loputtomiin, ja liian suurina pitoisuuksina hiilidioksidista voi olla jopa haittaa. Pohjoisten maa-alueiden voimistuneen yhteyttämisen sitomasta hiilidioksidista suuri osa näyttää kuitenkin tätä nykyä vapautuvan syksyisin voimistuneen soluhengityksen vaikutuksesta.

**Amazonin sademetsää** uhkaavat ilmastonmuutos ja hakkuut sekä muut maankäytön muutokset. Näistä tekijöistä johtuen rajutkin muutokset vuoteen 2100 mennessä ovat mahdollisia. Asiantuntija-arvioiden mukaan maapallon keskilämpötilan kohoaminen noin 3 asteella voisi aiheuttaa laajaa Amazonin sademetsän häviämistä. Joidenkin tutkimusten mukaan nostettaessa ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden taso kaksinkertaiseksi nykyisestä kuluvan vuosisadan loppuun mentäessä Amazonin sademetsästä 70 % olisi muuttunut savanniksi tai caatinga-metsäksi. Amazonin sademetsän kuivuminen vaikeuttaisi huomattavasti alueen yhdyskuntien makean veden saantia ja aiheuttaisi eliölajien monimuotoisuuden menetyksiä.

**Ikiroudan sulaminen** näyttää tutkimusten mukaan tällä vuosisadalla kiihtyvän ilmaston lämpenemisen vaikutuksesta molempien pallonpuoliskojen subarktisella alueella sekä vuoristoissa. Ikiroudan sulaminen nopeuttaa ikiroudassa aikaisemmin jäätyneenä olleen orgaanisen aineen hajoamista ja vapauttaa ilmakehään suuria määriä kasvihuonekaasuja, mikä voimistaa kasvihuoneilmiötä entisestään. Mallilaskelmissa, joissa simuloitiin pinnan läheisen ikiroutakerroksen pinta-alan kehitystä (pois lukien mannerjäätiköt) kuluvan vuosisadan aikana, pinnan läheisestä ikiroudasta on vuonna 2100 B1-skenaariossa enää jäljellä 40 % (A2-skenaariossa enää 10 %). Ikiroudan sulaminen heikentää maan kantavuutta ja vaikeuttaa arktisten alueiden luonnonvarojen – kuten öljyn ja maakaasun – etsintää, poraamista ja kuljettamista maateitse. Vuoristoalueilla ikiroudan sulaminen epävakauttaa rinteitä ja lisää maanvyöryjen riskiä.

**El Niño -ilmiön** mallisimulaatioissa on saatu hyvin erilaisia tuloksia. Useimmissa malleissa keskimääräinen lämpötila nousee hiukan enemmän Tyynenmeren itä- kuin länsiosassa, eli tulevat keskimääräisolut muistuttavat enemmän El Niño – kuin La Niña -tilannetta. Muutokset El Niño – La Niña -vaihtelun amplitudissa ja esiintymistiheydessä kuitenkin vaihtelevat mallista toiseen.

Nykykäsityksen mukaan **merten pohjien** lämpeneminen ja siihen liittyvä **metaaniklatraattien** vapautuminen on hidas prosessi, sillä lämmön tunkeutuminen pohjasedimentteihin vie aikaa. Tulevaisuuden lämmenteessä ilmastossa merkittäviä määriä metaania näyttäisi tutkimusten mukaan vapautuvan merten metaaniklatraatteista todennäköisesti vasta tuhansien vuosien aikaskaalassa.

Äärimmäisiin ja epälineaaristen ilmaston muutosten ennustamiseen liittyy paljon epävarmuutta. Tämän epävarmuuden pienentäminen vaatii sekä havaintoihin perustuvaa tutkimusta että jo olemassa olevien mallien tarkentamista. Tämän tutkimuksen tulee kattaa ilmastojärjestelmän nykyisen ja tulevan toiminnan lisäksi myös sen menneisyys, jotta voitaisiin paremmin ymmärtää aiemmin tapahtuneita äkillisiä muutoksia ja niiden syitä.

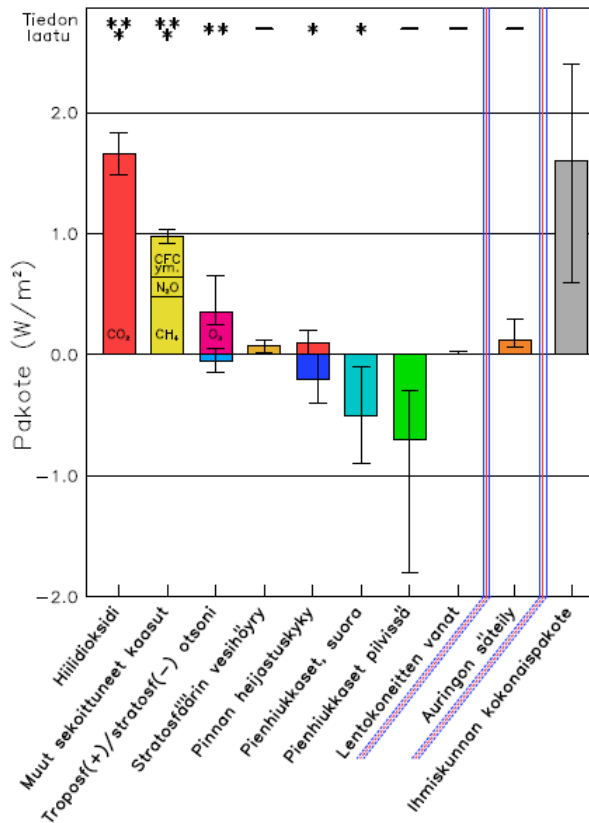
## 7 KIRJALLISUUSVIITTEET

- Alcamo J., J.M. Moreno, B. Nováky, M. Bindi, R. Corobov, R.J.N. Devoy, C. Giannakopoulos, E. Martin, J.E. Olesen, A. Shvidenko, 2007. Europe. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 541–580.
- Alley R.B. et al., 2002. Abrupt Climate Change: Inevitable Surprises. US National Research Council Report, National Academy Press, Washington, DC, 230 pp.
- Anthoff D., Nicholls R.J., Tol R.S.J. & Vafeidis A.T., 2006. Global and regional exposure to large rises in sea-level: a sensitivity analysis. Tyndall Centre for Climate Change Research. Working Paper 96.
- Arnell N., Tompkins E., Adger N. & Delaney K., 2005. Vulnerability to abrupt climate change in Europe. Tyndall Centre for Climate Change Research. Report to ESRC Environment and Human Behaviour Programme. Tyndall Centre Technical Report 34.
- Cuffey Kurt M., Marshall, Shawn J., 2000. Substantial contribution to sea-level rise during the last interglacial from the Greenland ice sheet. *Nature* 404: 591–594. doi:10.1038/35007053.
- Cox P. M., Betts R. A., Jones C. D., Spall S. A. & Totterdell I. J., 2000. Acceleration of global warming due to carbon cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature* 408, 184–187.
- Cook H. K. & Vizy E. K., 2008. Effects of Twenty-First-Century Climate Change on the amazon Rain Forest. *Journal of Climate*, 21, 542–560.
- Fankhauser S., 1995. Valuing Climate Change: The Economics of the Greenhouse, Earthscan Publications Ltd., London.
- Friedlingstein et al., 2006. Climate–Carbon Cycle Feedback Analysis: Results from the C4MIP Model Intercomparison. *Journal of Climate*, 19, 14, 3337–3353.
- Halonen M., Vanhanen J. & Pathan A., 2008. Skenaariokatsaus. Skenaariot pitkän aikavälin ilmastopolitiikan laadinnassa. Tulevaisuusselontekotyön taustaselvitys. Valtioneuvoston kanslian julkaisusarja 15/2008.
- Harvey L. D. D., 2000. Global Warming: the Hard Science, Prentice Hall, 336 s.
- Hassol, S. J., 2004. ACIA, Impacts of a warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press. 139 s.
- Holland M.M., 2006. Future abrupt reductions in the summer Arctic sea ice, *Geophys. Res. Lett* 33:L23503.
- Houghton et al. (toim), 1990. Scientific Assessment of Climate change. Cambridge Univ. Press, 365 s.
- Houghton et al. (toim), 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge Univ. Press, New York, 881 s.

- IPCC, 2007a. Climate Change 2007: The Physical Science basis. Contribution of Working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental panel on Climate Change, eds Solomon S., Gin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. Cambridge University press, Cambridge, UK.
- IPCC, 2007b. Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental panel on Climate Change, eds M. Parry et al. Cambridge, UK.
- Katz M.E., D.K. Pak, G.R. Dickens & K.G. Miller, 1999. The source and fate of massive carbon input during the Latest Paleocene Thermal maximum. *Science*, 286, 1531–1533.
- Lenton T. M., H. Held, E. Kriegler, J. W. Hall, W. Lucht, S. Rahmstorf and H. J. Schellnhuber, 2008. Tipping Elements in the Earth System, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 105, 6, 1786–1793.
- Lawrence D. M., and A. G. Slater, 2005. A projection of severe near-surface permafrost degradation during the 21<sup>st</sup> century. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L24401, doi:10.1029/2005GL025080
- Levermann A., et al. 2005. Dynamic sea level changes following changes in the thermohaline circulation. *Clim. Dyn.*, 24, 347–354.
- Lindsay R. W. and J. Zhang, 2005. The thinning of arctic sea ice, 1988–2003: have we passed a tipping point? *J. Climate*, 18, 4879–4894.
- Magrin G., C. Gay García, D. Cruz Choque, J.C. Giménez, A.R. Moreno, G.J. Nagy, C. Nobre and A. Villamizar, 2007. Latin America. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 581-615.
- Melillo J. M. et al., 1993. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature* 363, 234–240.
- Mikolajewicz U., M. Gröger, E. Maier-Reimer, G. Schurgers, M. Vizcaíno, A. M. E. Winguth, 2007. Long-term effects of anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions simulated with a complex earth system model, *Clim. Dyn.* 28:599–633.
- Nakicenovic N. et al., 2000. Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Oechel W. C. et al., 1993. Recent change of arctic tundra ecosystems from a carbon sink to a source. *Nature*, 361, 520–523.
- Oechel W. C. et al., 2000. Acclimation of ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in the Alaskan Arctic in response to decadal climate warming. *Nature*, 406, 978–981.
- Oppenheimer M. & R.B. Alley, 2004. The West Antarctic Ice Sheet and long term climate policy. *Climatic Change*, 64, 1–10.

- Piao S., P. Ciais, P. Friedlingstein, P. Peylin, M. Reichstein, S. Luysaert, H. Margolis, J. Fang, A. Barr, A. Chen, A. Grelle, D.Y. Hollinger, T. Laurila, A. Lindroth, A. D. Richardson & T. Vesala, 2008. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature*, 451, 49–52.
- Rahmstorf S., 2006. Thermohaline Ocean Circulation. *Encyclopedia of Quaternary Sciences*. Elsevier, Amsterdam.
- Rahmstorf et al., 2007. Recent climate observations compared to projections. *Science Express*, 10.1126/science.1136843
- Raupach M.R., Marland, G., Ciais, P., Le Quere, C., Canadell, J.G., Klepper, G., Field, C.B., 2007. Global and regional drivers of accelerating CO<sub>2</sub> emissions. *PNAS*, Vol. 104, no.24, p. 10288–10293.
- Savolainen, I., Soimakallio, S., Lindroos, T. & Syri, S. 2008. Kahden asteen ilmastotavoite – mitä riskejä vältetään, miten paljon päästöjä tulee vähentää. *Tulevaisuusselonteon taustaselvitys*. Valtioneuvoston kanslian julkaisusarja 13/2008.
- Scherer R. P., Aldahan A, Tulaczyk S, Possnert G, Engelhardt H, Kamb B, 1998: Pleistocene Collapse of the West Antarctic Ice Sheet, *Science*, 281:82-85.
- Stern N., 2006. *Stern Review on the economics of climate change*.
- UNEP, 2007. *Global outlook for Ice&Snow*. ISBN: 9789280727999. 235 p.
- Vaughan D. G., 2007. West Antarctic Ice Sheet collapse – the fall and rise of a paradigm. *Climatic Change*. (In Press) <http://nora.nerc.ac.uk/769/>
- Velicogna I. & J. Wahr, 2006. Measurements of Time-Variable Gravity Show Mass Loss in Antarctica. *Science*, 311, 1754–1756.
- Vesala T., 2008. Warming of autumns and carbon exchange of a boreal pine forest. *Meteorologian seminaari (8.5.2008 Helsingin yliopisto)*
- Winton, M. 2006. Does the Arctic sea ice have a tipping point? *Geophys.Res. Lett.*, 33, L23504.
- Witze A. 2008. Climate change: Loosing Greenland, *Nature*, doi:10.1038/452798a, <http://www.nature.com/news/2008/080416/full/452798a.html>
- Zeng N., Ding, Y., Pan, J., Wang, H., Gregg, J., 2008. Climate Change – the Chinese Challenge. *Science*, Vol. 319, P. 730–731.

## LIITE 1: Säteilypakotetta aiheuttavat tekijät



Säteilypakotetta aiheuttavat tekijät (pylväät vasemmalta oikealle): (1) hiilidioksidin lisääntyminen, (2) muiden hyvin sekoittuneitten kasvihuonekaasujen (metaani, typpioksiduuli, halogenisoidut hiilivedyt ym.) lisääntyminen, (3) otsonin lisääntyminen troposfäärissä (lämmittävä) ja vähentyminen stratosfäärissä (jäähdyttävä), (4) metaanin hajotessa muodostunut stratosfäärin vesihöyry, (5) maan pinnan heijastuskyvyn muutokset (vaikutuksia molempiin suuntiin), (6) pienhiukkasten (aerosolihiukkasten) suora vaikutus, (7) pienhiukkasten epäsuora vaikutus (toimiminen pilvipisaroiden tiivistymisytiminä), (8) lentokoneitten tiivistymisvanat ja (9) auringonsäteilyn muutokset. Pylvään korkeus kertoo parhaan arvion säteilypakotteen suuruudelle, kunkin pylvään päässä oleva jana tämän arvion epävarmuusvälin. Kuvan yläreunassa on kerrottu tähtien lukumäärän avulla arvion tieteellinen hyvyys: kolme tähteä – ilmiö tunnetaan hyvin, ..., ei tähtiä – tunnetaan varsin huonosti. Säteilypakotteet on saatu vertaamalla v. 2005 tilannetta oloihin ennen teollista aikaa v. 1750. Viimeinen pylväs kuvaa ihmiskunnan aiheuttamien muutosten (pylväät 1–8) yhteisvaikutusta; tätä yhteisvaikutusta ei saada suoraviivaisesti eri pakotetekijöitä yhteenlaskemalla, sillä laskennassa on otettava huomioon eräiden pakotteiden epävarmuusvälien epäsymmetrisyys. Kuvasta on jätetty pois joitakin kovin huonosti tunnettuja pakotetekijöitä. Esimerkiksi tulivuorenpurkausten aiheuttama pakote vaihtelee ajan suhteen hyvin voimakkaasti. Lentokoneitten tiivistymisjuoviin liittyvä pakote ei sisällä lentoliikenteen mahdollista vaikutusta pilvisyyteen. Lähde IPCC, 2007.

## LIITE 2: IPCC:n käyttämät SRES-päästöskenaariot

Päästöskenaarioita on esitelty yksityiskohtaisesti IPCC:n erikoisraportissa (Nakicenovic ym., 2000). Siinä on tarkasteltu neljää kehityskulkua, joista ensimmäinen jakautuu vielä kolmeen alaskenaarioon. Alla esitellään pääpiirteittäin erikseen kulutusyhteiskuntaskenaariot (A-skenaariot) ja kestävään kehitykseen tähtäävät skenaariot (B-skenaariot).

A1-skenaarioperhe kuvaa tulevaisuuden maailmaa, jossa talouskasvu on hyvin nopeaa ja maapallon väestö kasvaa kuluvan vuosisadan puoliväliin saakka alkaen sen jälkeen pikku hiljaa vähentyä. Tekniikan kehitys on nopeaa, ja uusi tekniikka otetaan nopeasti käyttöön ympäri maailmaa. Kansainvälisen vuorovaikutuksen oletetaan olevan vilkasta sekä maapallon eri alueitten kehityserojen kaventuvan ja tulonjaon tasaantuvan. A1-skenaarioperhe jakaantuu kolmeen eri alaskenaarioon. A1FI-skenaariossa oletetaan tulevan energiantuotannon perustuvan edelleenkin nimenomaan fossiilisten polttoaineitten käyttöön, A1T-skenaariossa taas ei-fossiilisiin energianlähteisiin. A1B-skenaario edustaa näitten vaihtoehtojen välimuotoa.

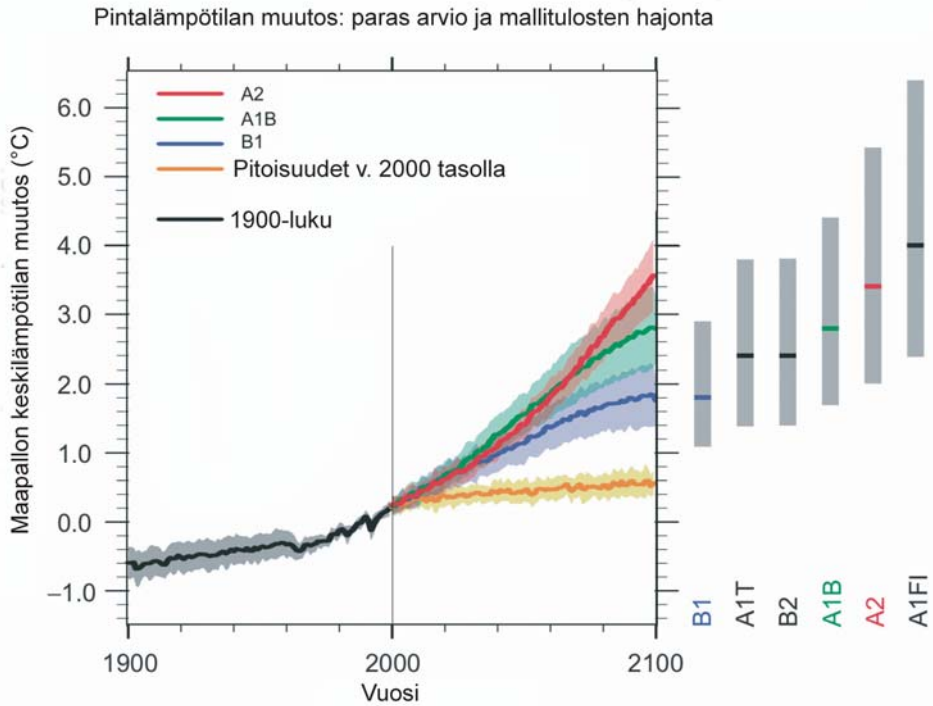
A2-skenaariossa teollisuus- ja kehitysmaitten kehityserot säilyvät suurina. Maapallon eri alueet pyrkivät omavaraisuuteen ja oman erikoislaatusensa säilyttämiseen. Teknologian siirto kehitysmaittain on vähäistä, ja eri maitten väliset tuloerot säilyvät suurina. Koko maapalloa ajatellen taloudellinen kehitys on hitaampaa kuin A1-skenaarioissa. Väestönkasvu jatkuu kehityksessä nopeana ja maapallon väkiluku kasvaa nopeasti.

B1-skenaariossa teollisuus- ja kehitysmaitten erot tasaantuvat, mikä saa väestönkasvun taltumaan, aivan kuten A1-skenaarioissakin. Erona A-skenaarioihin on, että talous suuntautuu tavaratuotannon asemesta enemmän palveluiden ja tietoyhteiskunnan kehittämiseen. Kestävä kehitys on arvossaan, ja ympäristölle ystävällisen teknologian kehittäminen ja käyttöönotto on nopeaa. Ongelmiin pyritään etsimään maailmanlaajuisia, koko ihmiskunnan kannalta oikeudenmukaisia ja ympäristön säilymisen huomioon ottavia ratkaisuja.

B2-skenaariossa pyritään myös ottamaan ympäristönäkökohdat huomioon päätöksenteossa, mutta päätökset määräytyvät enemmän paikallisten etujen perusteella kuin B1-skenaariossa. Eri alueitten kehityserot säilyvät suurina ja väestönkasvu jatkuu, tosin ei yhtä nopeana kuin A2-skenaariossa. Talouden ja tekniikan kehitys on kohtuullisen nopeaa, mutta jakautuu epätasaisesti maapallon eri alueille.

IPCC:n näkemyksen mukaan kaikki nämä tulevaisuuden skenaariot ovat mahdollista, eikä mitään tiettyä skenaarioita voida pitää muita todennäköisempänä. Nämä SRES-skenaariot ovat samoja kuin mitä käytettiin jo IPCC:n (2001) 3. arviointiraportin yhteydessä.

### LIITE 3: Maapallon keskilämpötilan muutos eri skenaarioissa

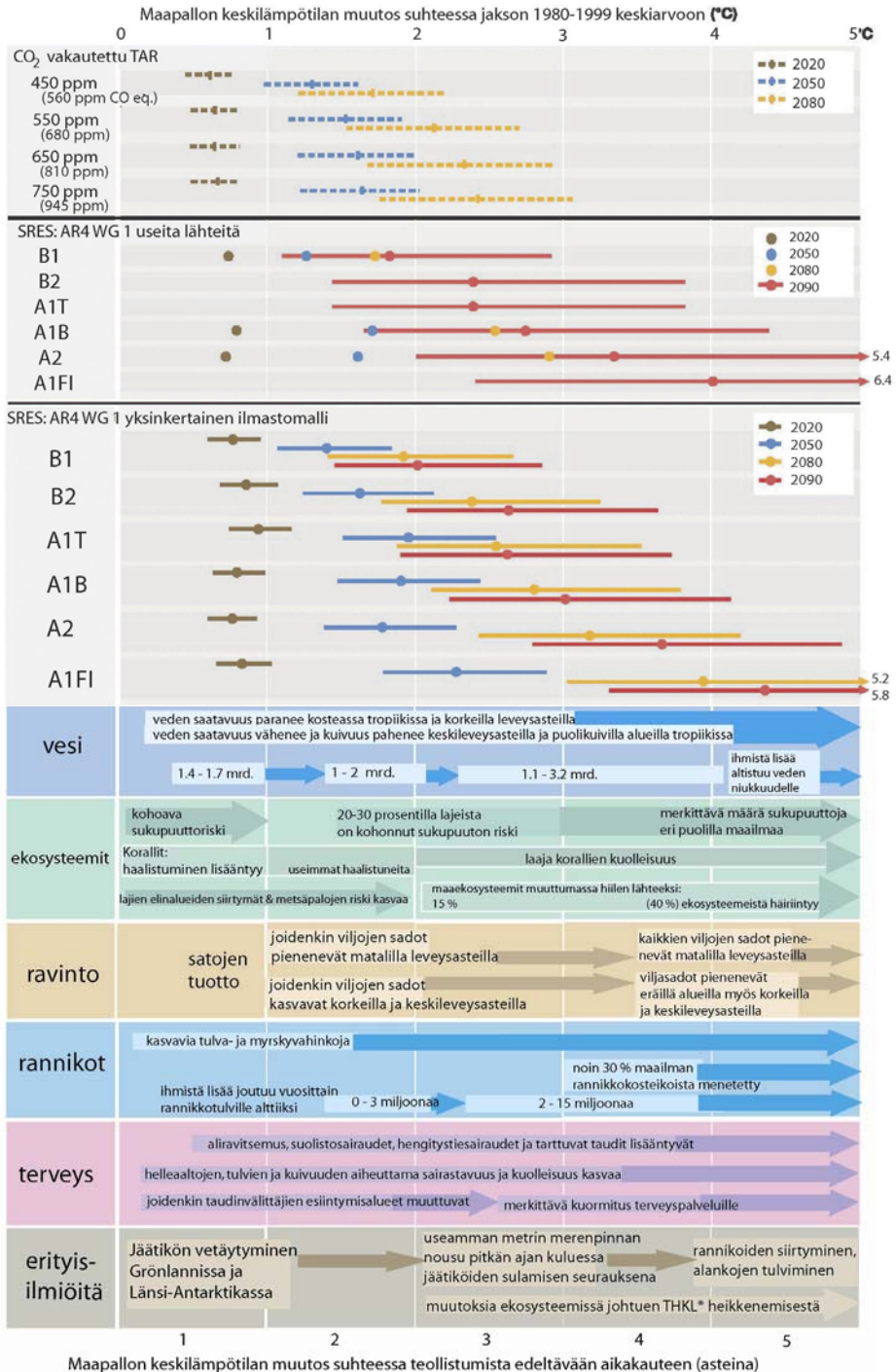


Malleilla simuloitu maapallon keskilämpötilan tähänastinen muutos (1900–2000; musta käyrä) ja ennustettuja muutoksia vuosille 2000–2100; usean ilmastomuutosmallin tulosten keskiarvoja. Ennusteet on esitetty erikseen A2- (punainen käyrä), A1B- (vihreä) ja B1-skenaariolle (sininen); oranssi käyrä kuvaa ennustettua lämpötilan muutosta tilanteessa, jossa kaasujen ja hiukkasten pitoisuudet on pidetty v. 2000 vallinneella tasolla. Kaikki lämpötila-arvot on ilmaistu muutoksina suhteessa jakson 1980–1999 keskiarvoon. Epävarmuusasteen mittana kunkin käyrän ympärillä on merkitty varjostuksella  $\pm$  yhden keskihajonnan levyinen alue. Kuvan oikeassa reunassa olevat harmaat pylväät kertovat parhaan arvion ja epävarmuusvälin ennustetulle lämpenemiselle v. 2100, erikseen kuudelle SRES-skenaariolle. Pylväitten esittämiä arvioita laadittaessa on käytetty kolmiulotteisten kytkettyjen mallien lisäksi myös muuta tietoa, kuten yksinkertaisempien ilmastomallien tuloksia.

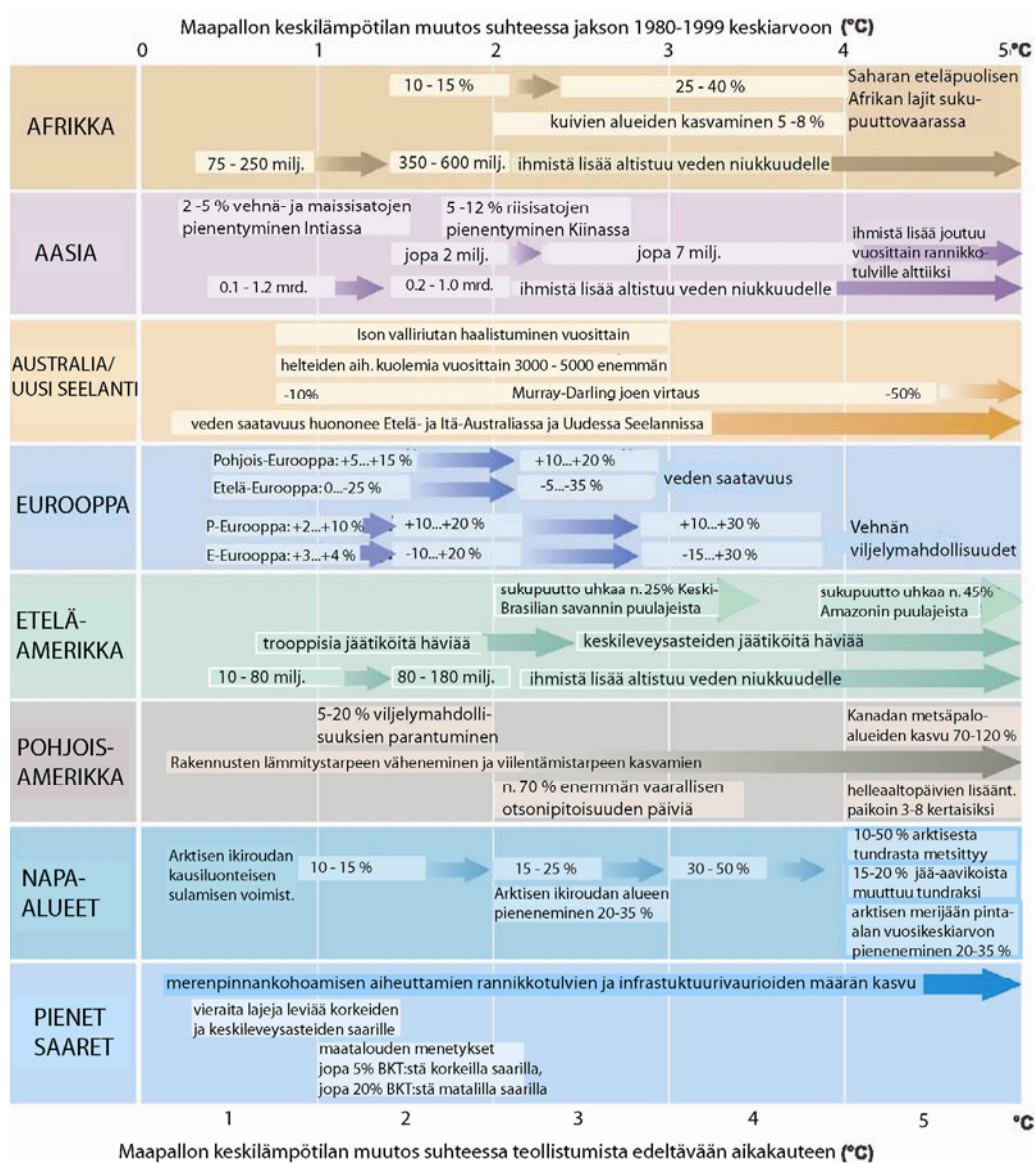


# LIITE 4: Taulukot TS3 ja TS4

**Taulukko TS3** Ilmaston lämpenemisen vaikutuksia, ks. taulukon seloste liitteen lopussa.



**Taulukko TS4** Esimerkkejä ilmaston lämpenemisen alueellisista vaikutuksista, ks. taulukon seloste liitteen lopussa.



## Selitykset taulukoille TS3 ja TS4

TAR= Hallitusten välisen ilmastonmuutospaneelin kolmas arviointiraportti, 2001

AR4= Hallitusten välisen ilmastonmuutospaneelin neljäs arviointiraportti, 2001

THKL= Pohjois-Atlantin termohaliininen kiertoliike

BKT= bruttokansantuote

Sukupuutoissa merkittävä määrä tarkoittaa tässä 40–70 %.

Taulukoissa TS3 ja TS4 on havainnollisia esimerkkejä ennakoitujen ilmastonmuutosten (ja soveltuvin osin merenpinnan ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuuksien muutosten) maailmanlaajuisista vaikutuksista tällä vuosisadalla. Laatikkojen reunat ja tekstien sijainti osoittavat lämpötilanmuutoksen aluetta, joihin vaikutukset liittyvät. Nuolet laatikoiden välillä osoittavat vaikutuksen kasvamista arvioiden välillä. Muut nuolet osoittavat vaikutusten trendejä. Veden niukkuuteen ja tulviin liittyvät lukuarvot kuvaavat ilmastonmuutoksen lisävaikutuksia verrattuna tilanteeseen, jota ennakoitiin SRES-raportin (Special Report on Scenarios, IPCC 2000) A1FI-, A2-, B1- ja B2-skenaarioissa. Sopeutumistoimien vaikutuksia ei ole otettu huomioon.

Lisäksi taulukossa TS3 on esitetty maapallon keskilämpötilan muutos (suhteessa 1980–1999 jaksoon) valituille ajanjaksoille eri SRES- ja vakauttamis-skenaarioille. Arviot ovat vuosille 2020, 2050, 2080, ja 2090. SRES-skenaarioihin perustuvat arviot on esitetty kahdella eri lähestymistavalla.

Keskimmäisen paneelin arviot ovat peräisin IPCC:n neljännestä arviointiraportista (AR4) ja perustuvat SRES-skenaarioihin. Parhaat arviot perustuvat ilmakehä-valtamerimallien tuloksiin (merkitty värikkäillä pisteillä).

Alin paneeli: yksinkertaisen ilmastomallin antama todennäköisin lämpenemisarvio ja epävarmuusväli (AR4).

Ylin paneeli: paras arvio lämpenemiselle ja epävarmuusväli, perustuen hiilidioksidin vakauttamis-skenaarioihin käyttämällä yksinkertaista ilmastonmuutosmallia. Tulokset ovat peräisin kolmannelta arviointiraportista (TAR), koska vastaavia ei ole saatavilla AR4:ssa.



VALTIONEUVOSTON KANSLIA

SNELLMANINKATU 1, HELSINKI  
PL 23, 00023 VALTIONEUVOSTO  
p. (09) 16001, (09) 57811  
f. (09) 1602 2165  
julkaisut@vnk.fi  
www.vnk.fi/julkaisut



441

Painotuote

697

ISBN 978-952-5631-79-1



9 789525 631791

Tätä julkaisua myy ja välittää:  
Yliopistopainon kirjamyynti  
[www.yliopistopaino.fi/kirjamyynti](http://www.yliopistopaino.fi/kirjamyynti)  
books@yliopistopaino.fi  
PL 4 (Vuorikatu 3 A)  
00014 HELSINGIN YLIOPISTO  
Puhelin (09) 7010 2363  
Fax (09) 7010 2374

ISBN 978-952-5631-79-1 (nid)  
ISBN 978-952-5631-80-7 (pdf)  
ISSN 0782-6028