

MAAILMANLAAJUISIIN ILMASTOMALLEIHIN PERUSTUVIA LÄMPÖTILA- JA SADEMÄÄRÄSKENAARIOITA

ACCLIM-hankkeen 2. osahankkeessa (T2) tehtävänä on laatia ilmastonmuutosskenaarioita maailmanlaajuisen ilmastomallien tulosten perusteella. Osahankkeen vastuuhenkilönä toimii Kimmo Ruosteenoja Ilmatieteen laitokselta. Tässä esitellään osahankkeessa v. 2007 kesäkuuhun mennessä saatuja keskeisimpiä tuloksia.

ILMASTOSKENAARIOITTEN LAATIMINEN

Esitettävät lämpötila- ja sademääräskenaariot perustuvat 19 maailmanlaajuisella ilmastomallilla tehtyihin kokeisiin. Nämä mallit muodostavat osajoukon IPCC:n (2007) 4. arviointiraportissa käytetyistä 23 mallista. Omiin skenaariolaskelmiimme olemme kelpuuttaneet mallit, jotka täyttävät seuraavat ehdot:

- Kyseisellä mallilla pitää olla tehtynä vähintään kahta SRES-päästöskenaariota vastaavia ajoja.
- Mannerten ja merien sijainnin Euroopan ja Pohjois-Atlantin alueella pitää olla mallissa totuudenmukainen.
- Mallin pitää pystyä kuvaamaan Suomen nykyinen ilmasto vähintäänkin tyydyttävästi.

Tämän seulan läpäisi siis 19 mallia.

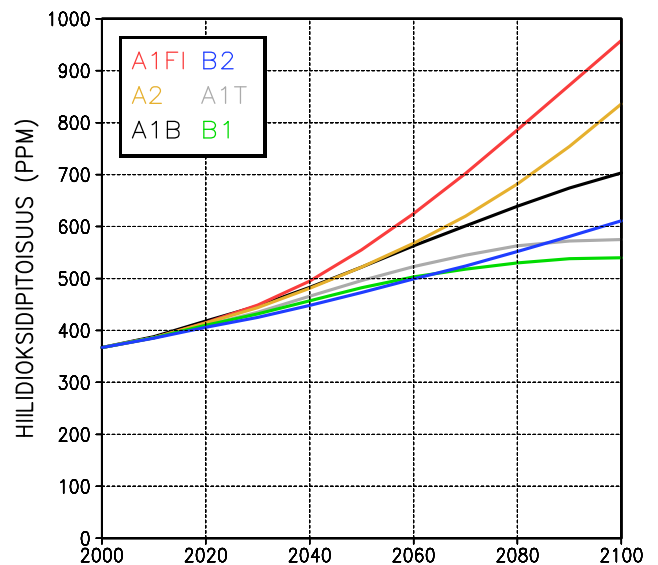
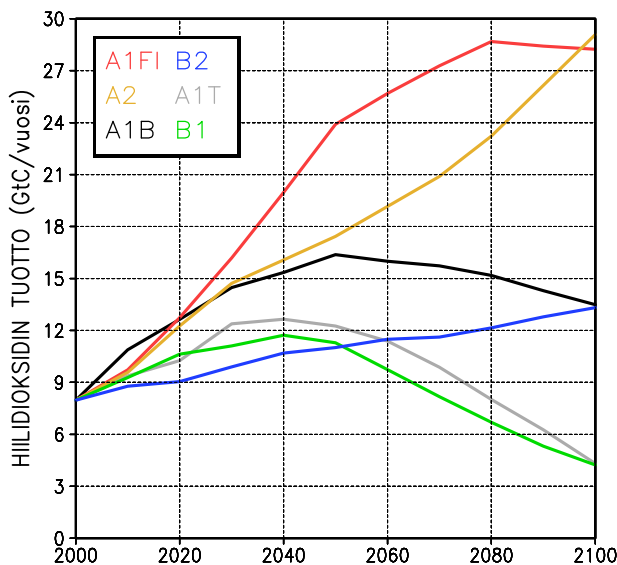
Kaikki mallit eivät ole toisistaan riippumattomia, vaan mukana on samojen tutkimuskeskusten mallien eri versioita. Seulonnan jälkeen yksikään tutkimuskeskus ei kuitenkaan saanut mukaan analyysiin enempää kuin kaksi malliversiotaan. Tässä mielessä 19 mallin otosta voidaan siis pitää kohtuullisen edustavana.

Ilmastonmuutosennusteita varten laskettiin, paljonko lämpötila tai sademäärä on muuttunut verrattuna perusjaksoon eli vuosien 1971-2000 keskiarvoon nähden. Ennusteet ulottuvat noin vuoteen 2100 saakka. Suomen lisäksi ennusteita on laadittu myös joukolle muita alueita (koko Pohjois-Eurooppa, Baltia, Komin ASNT...), joskin tässä esityksessä keskitymme lähinnä Suomeen.

Tulevia ilmastonmuutoksia koko maapallon mittakaavassa on käsitelty IPCC:n (2007) 4. arviointiraportissa. Tämän raportin keskeisistä tuloksista kertovasta yhteenvedosta on laadittu suomennos, joka on luettavissa verkko-osoitteessa www.ilmatieteenlaitos.fi/IPCC.

KASVIHUONEKAASUJEN PÄÄSTÖ- JA PITOISUUSKENAARIOT

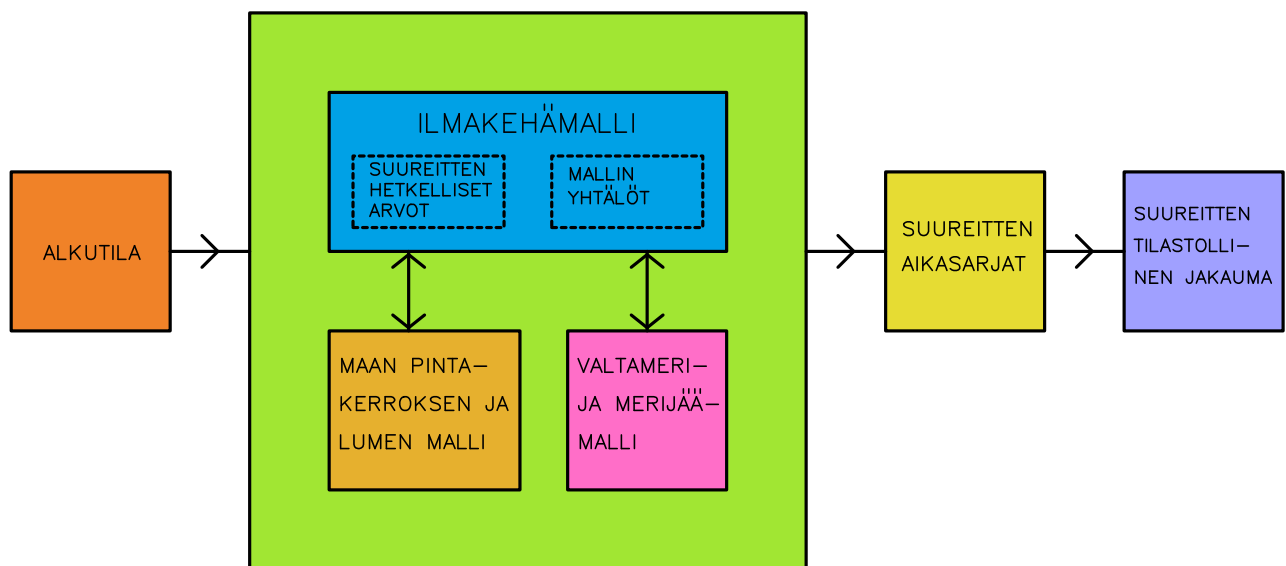
- Ihmiskunnan tuottamista kasvihuonekaasuista **hiilidioksidi** on tärkeämpi kuin kaikki muut kaasut yhteensä. CO₂:n pitoisuus ilmakehässä oli ennen teollistumisen aikaa n. 280 ppm, nykyisin jo n. 380 ppm (ppm = tilavuuden miljoonasosa).
- Muita ihmisten tuottamia kasvihuonekaasuja ovat mm. metaani, typpioksiduuli, halogenisoidut hiilivedyt ja troposfäärin otsoni.
- Ihmiskunnan ilmakehään tuottamat leijuvat hiukkaset (“aerosolit”) ovat hidastaneet ilmaston lämpenemistä, mutta tulevaisuudessa niiden pitoisuuden ei enää ennakoida kovin paljoa kasvavan.
- Tulevaisuudessa hiilidioksidin pitoisuus ilmakehässä alati kasvaa (kuva 1). Pitoisuuden kasvuun lähivuosikymmeninä ei enää kyetä kovin paljoa vaikuttamaan, mutta pitoisuuksien kasvunopeus vuosisadan loppupuoliskolla riippuu ratkaisevasti tulevista päästöistä. Hyvin optimistisen B1-skenaarion toteutuessa pitoisuus olisi v. 2100 noin 540 ppm, eli suunnilleen kaksinkertainen teollistumista edeltävään aikaan verrattuna. Suhteellisen pessimistisessä A2-skenaariossa pitoisuus taas olisi kohonnut jo yli 800 ppm:n, ja nousu jatkuisi vuodesta 2100 eteenpäinkin.



Kuva 1. Hiilidioksidin päästöjen (vasen kuva) ja pitoisuuden (oikea kuva) arvioitu ajallinen kehitys kuuden SRES-skenaarion mukaan. Eri skenaariot poikkeavat toisistaan mm. väestönkasvun, tekniikan kehityksen ja ympäristönsuojeluun panostamisen suhteen. Skenaarioista on kerrottu IPCC-raportin yhteenvedon lopussa olevassa liitteessä, ks. www.ilmatieteenlaitos.fi/IPCC.

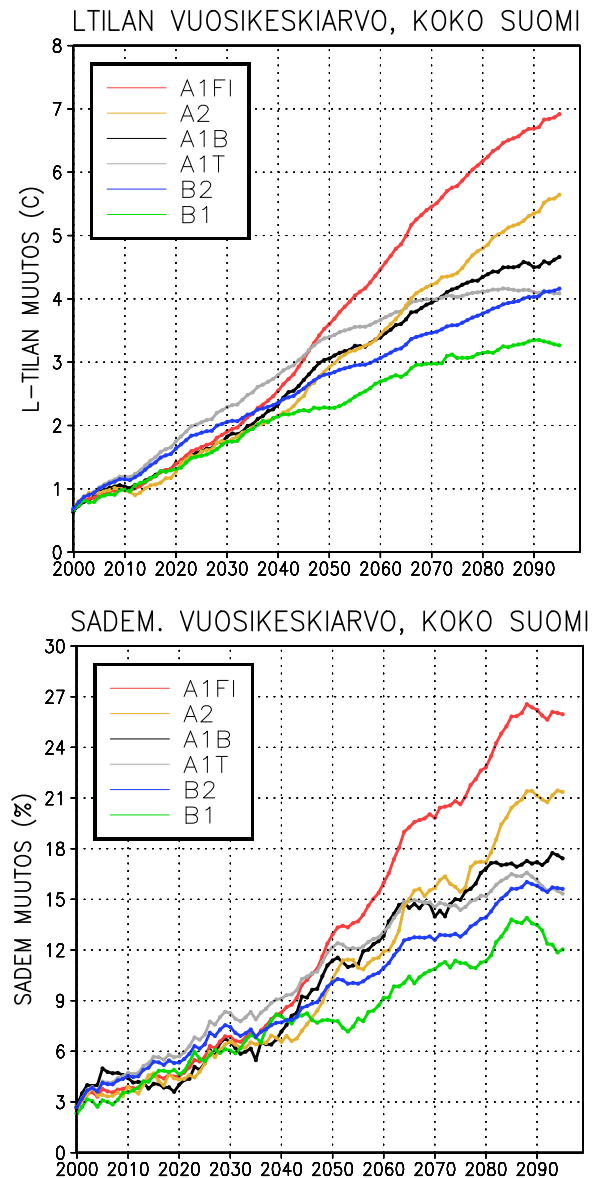
MITEN TULEVIA ILMASTONMUUTOKSIA ARVIOIDAAN?

- Tulevat CO₂-pitoisuudet saadaan syöttämällä päästöjen skenaario (kuvassa 1 vasemmalta) hiilen kiertokulkumallille.
- Myös muitten kasvihuonekaasujen sekä leijuvien hiukkasten pitoisuudet voidaan mallittaa, kun on käytössä arvio tulevista päästöistä.
- Saadut pitoisuusarvot (esimerkkinä hiilidioksidi kuvassa 1 oikealla) syötetään jollekin **ilmastonmuutosmallille**. Nämä mallit kuvaavat ilmastojärjestelmää tietokoneohjelman muotoon puettujen fysiikan lakien avulla (kuva 2).
- Tietokoneitten rajallisen suorituskyvyn takia monet ilmiöt joudutaan kuvaamaan malleissa yksinkertaistettuina. Eri malleissa tämä ongelma on ratkaistu eri tavoin, ja pääasiassa juuri tästä syystä mallien tulokset poikkeavat toisistaan.



Kuva 2. Ilmastomallin toimintaperiaate.

VUODEN KESKILÄMPÖTILAN JA SADEMÄÄRÄN MUUTTUMINEN SUOMESSA



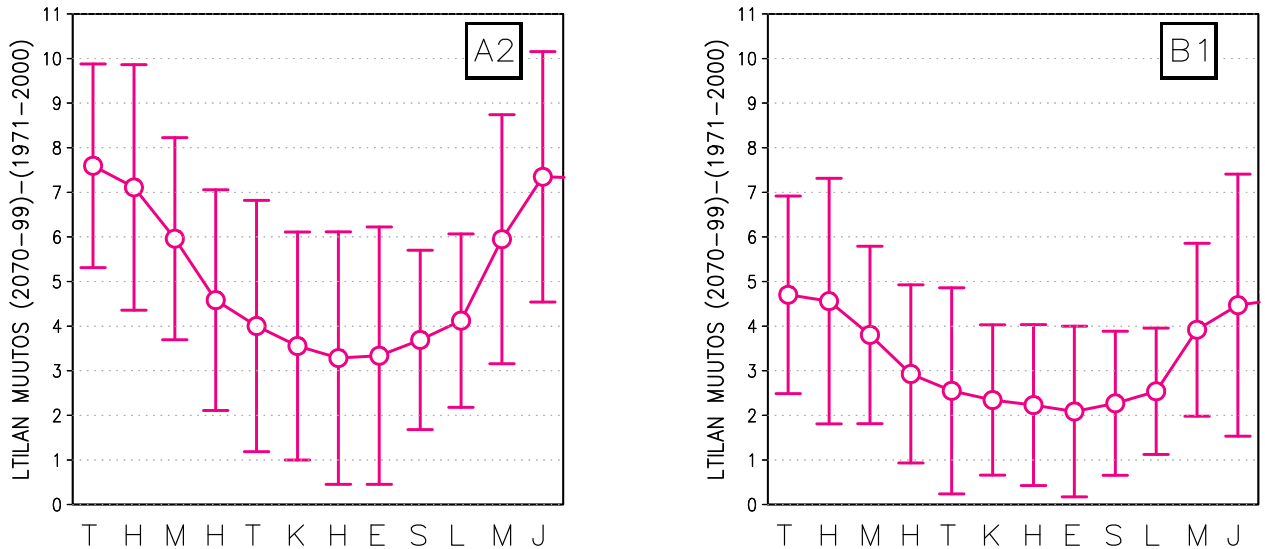
Kuva 3. Koko Suomen alueen vuotuisen keskilämpötilan (yläkuva) ja sademäärän (alakuva) vaihtelu vv. 2000-2100 verrattuna ilmastollisen normaalijakson 1971-2000 keskiarvoon. Nämä 19 mallin tulosten keskiarvona saadut ennusteet on esitetty erikseen kuudelle kasvihuonekaasujen päästöskenaariolle.

Lämpötila nousee ja sademäärä lisääntyy Pohjois-Suomessa jonkin verran nopeammin kuin maan eteläosissa.

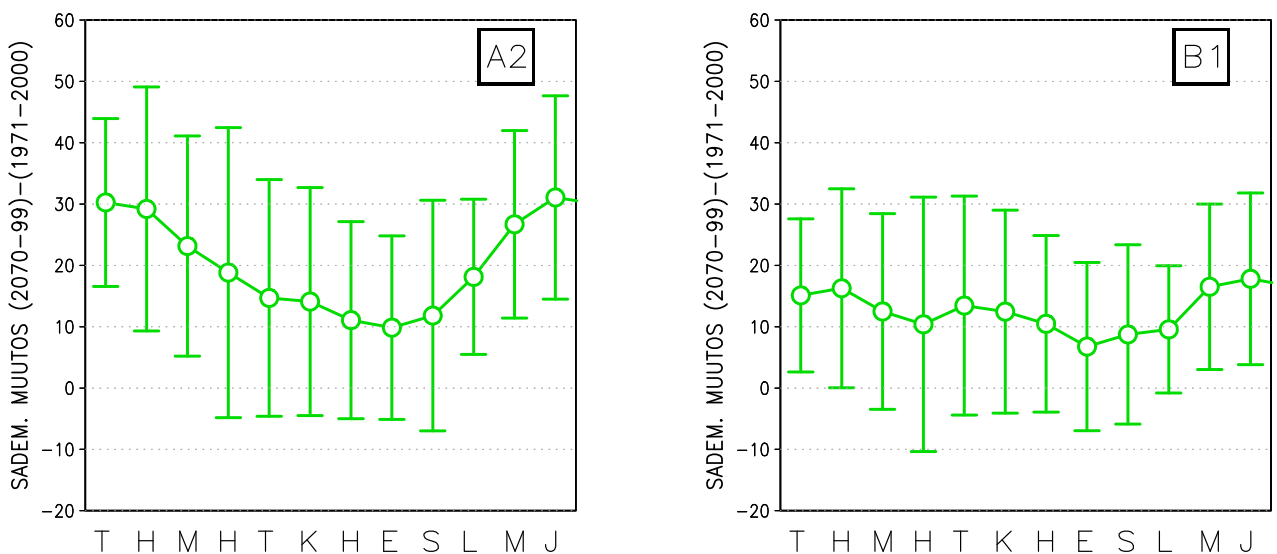
Todellisuudessa eri mallien antamat arviot poikkeavat toisistaan melko paljon. Tätä mallien välistä hajontaa ei ole näytetty kuvassa 3, mutta asia käy ilmi seuraavan sivun kuvista.

MUUTOKSET VUODEN ERI KUUKAUSINA

Sekä lämpeneminen että sademäärien lisääntyminen on talvella selvästi voimakkaampaa kuin kesällä. Eri mallien antamat tulokset kuitenkin poikkeavat toisistaan aika lailla (kuvat 4-5).

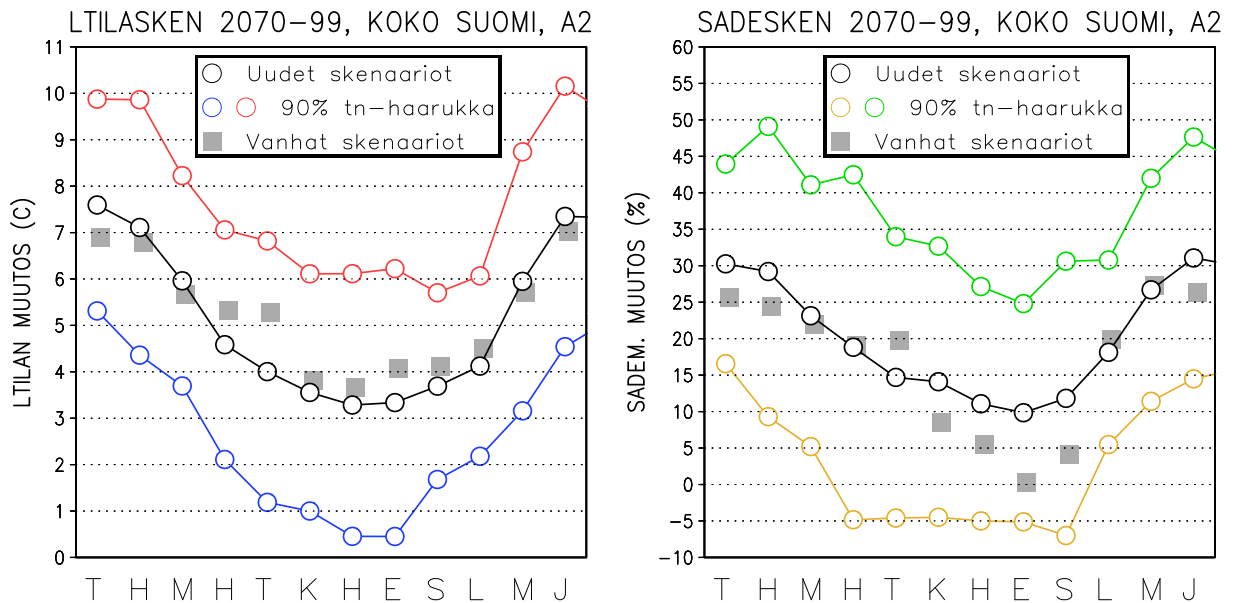


Kuva 4. Keskilämpötilojen muutos Suomessa ((1971–2000) → (2070–2099)) vuoden eri kuukausina. Käyrä esittää 19 eri ilmastomallin ennustamien muutosten keskiarvoa, pystypalkit muutoksen 90% todennäköisyydsväliä. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on annettu pessimististä A2-, oikeanpuoleisessa optimistista B1-skenaariota vastaavat muutokset. Kaikki luvut ovat koko Suomen alueen yli laskettuja keskiarvoja.



Kuva 5. Sademäärän %-muutos Suomessa 1900-luvun loppuvuosikymmenistä alkaen vuosisadan loppuun (ks. kuvan 4 selitystekstiä).

MITEN PALJON NYT LAADITUT SKENAARIOT POIKKEAVAT AIKAISEMMISTA ARVIOISTA?



Kuva 6. Lämpötilan ja sademäärän ennustettu muutos vuoden eri kuukausina nykyisten mallitulosten perusteella; 19 mallin tulosten keskiarvo ja mallitulosten perusteella saatu 90% todennäköisyysväli (käyrät). Harmaat laatikot kuvaavat aiempaa arviota, joka on saatu kuuden IPCC:n (2001) kolmanteen arviointiraporttiin osallistuneen mallin tulosten keskiarvona. Kaikki arvot ovat koko Suomen yli laskettuja keskiarvoja ja ne perustuvat A2-skenaarioon.

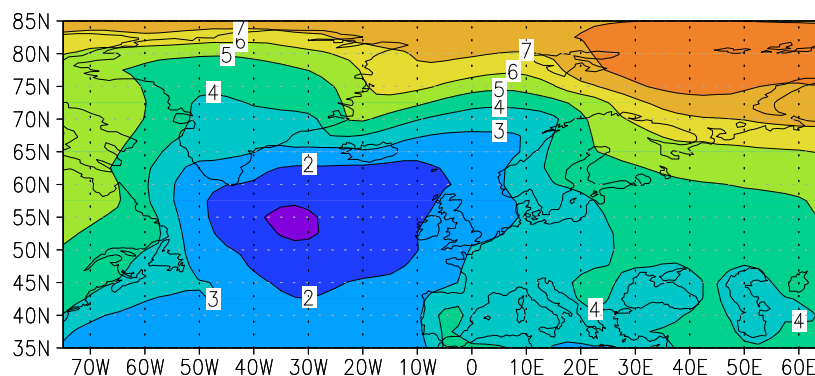
PÄÄTELMIÄ:

- Uusimpien mallien perusteella laaditut lämpötilaennusteet eivät näytä poikkeavan aiemmista arvioista kovinkaan paljoa, kahta kevätkuukautta lukuunottamatta.
- Uudet sademääräennusteet näyttävät useimpina vuoden kuukausina jonkin verran aiempia ennusteita “märemmiltä”. Huomattavin ero on loppukesällä. Edellisten mallitulosten perusteella näytti siltä, että esimerkiksi elokuussa sademäärä ei olisi muuttunut lainkaan, kun taas uudet mallit povaavat keskimäärin 10% sademäärän lisäystä.
- Sademäärissä 90% epävarmuushaarukka on jonkin verran pienentynyt, eli mallien tulokset poikkeavat toisistaan nyt hieman vähemmän kuin aikaisemmin.
- Kuitenkin mallien väliset erot ovat edelleen niin suuria, että aiemmat arviot sopivat kirkkaasti uusista mallituloksista määritetyn 90% epävarmuushaarukan sisäpuolelle.

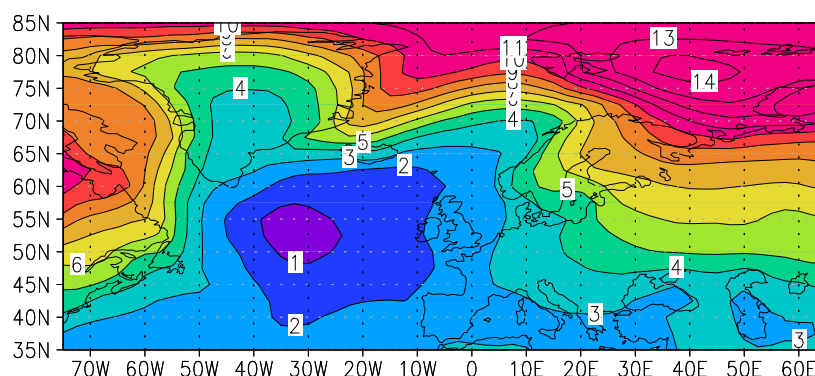
LÄMPÖTILAN NOUSUN MAANTIETEELLINEN JAKAUMA

LÄMPÖTILAN MUUTOS (2070–99)–(1971–2000)
A2–SKENAARIO, 19 MALLIN KESKIJARVO

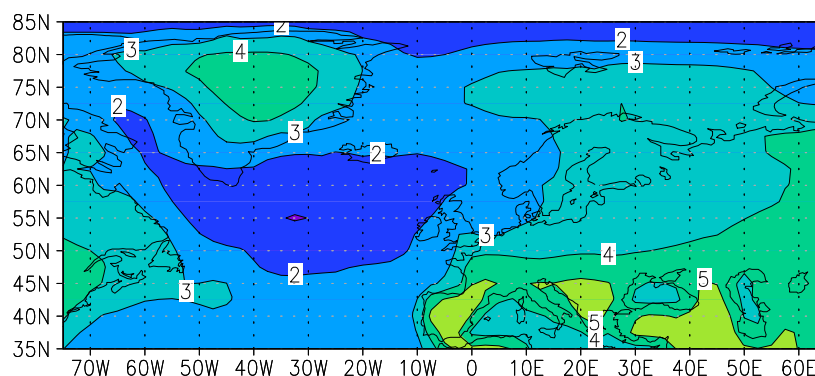
VUOSIKESKIJARVO



TALVI



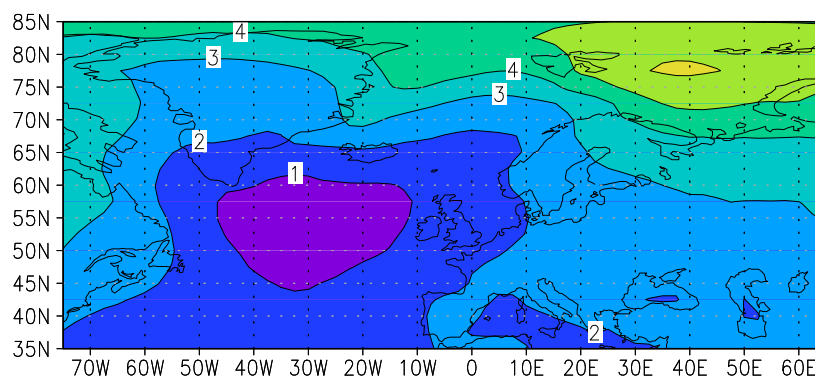
SUVI



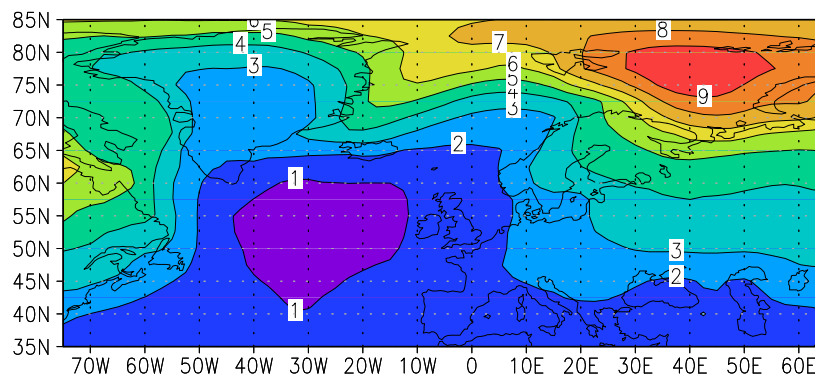
Kuva 7. Lämpötilan ennustettu nousu (1971–2000 → 2070–2099) koko vuoden aikana keskimäärin (yläkuva), joului-helmikuussa (keskimääräinen kuva) ja kesä-elokuussa (alakuva) Euroopan ja Pohjois-Atlantin alueella. Muutokset on laskettu 19 maapallonlaajuisen ilmastomuutosmallin A2-skenaarioajojen keskiarvona. Yksikkö °C.

**LÄMPÖTILAN MUUTOS (2070–99)–(1971–2000)
B1–SKENAARIO, 19 MALLIN KESKIAARVO**

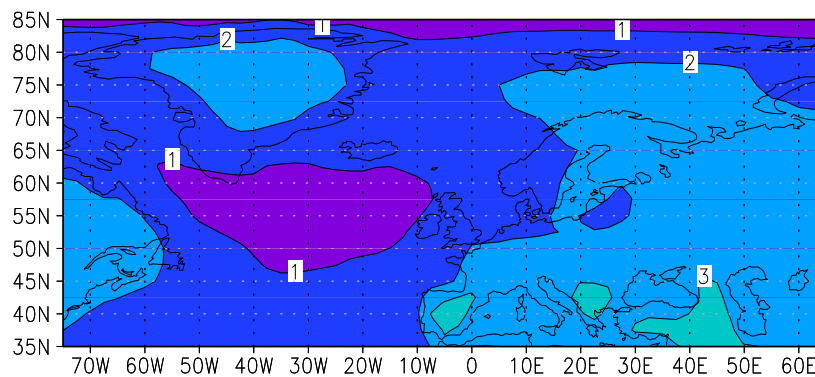
VUOSIKESKIAARVO



TALVI



SUVI



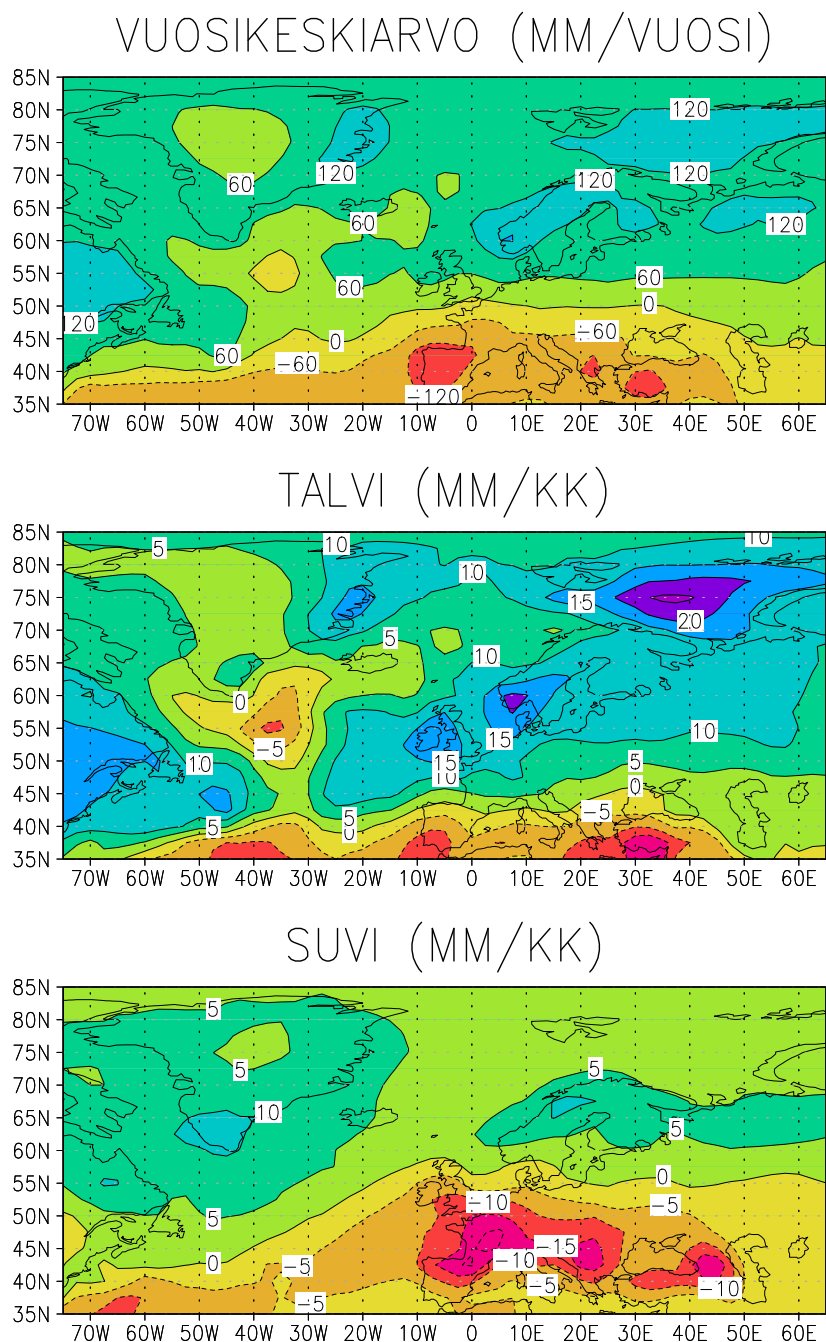
Kuva 8. B1-skenaariota vastaava lämpötilan nousu (ks. kuvan 7 selitystekstiä).

PÄÄTELMIÄ:

- Ilmastomallit heikentävät Pohjois-Atlantin lämmintä merivirtaa. Islannin eteläpuoleilla merialueilla lämpötilan nousu jää vähäiseksi, kun merivirran heikontuminen ja yleinen ilmaston lämpeneminen paljolti kumoavat toisensa (kuvat 7-8). Näillä alueilla myös meriveden voimakas sekoittuminen hidastaa lämpötilan nousua, kun lämpöenergia jakautuu paksuun vesikerrokseen.
- Merivirran täydellinen pysähtyminen ainakaan tämän vuosisadan aikana on varsin epätodennäköistä.
- Lämpimän merivirran heikkenemisestä huolimatta Suomessa lämpötila nousee selvästi.
- Pohjoisella jäämerellä jäätä on nykyistä vähemmän, mikä näkyy talvisten lämpötilojen voimakkaana kohoamisena.
- Etelä-Euroopassa maaperän kuivuminen kesäaikaan voimistaa lämpenemistä.
- B1-skenaarion toteutuessa (kuva 8) lämpötilan nousun maantieteellinen jakauma on hyvin samanlainen kuin mitä A2-skenaarion perusteella saatiin. Kuitenkin lämpeneminen on esim. Suomessa kolmanneksen verran heikompaa.

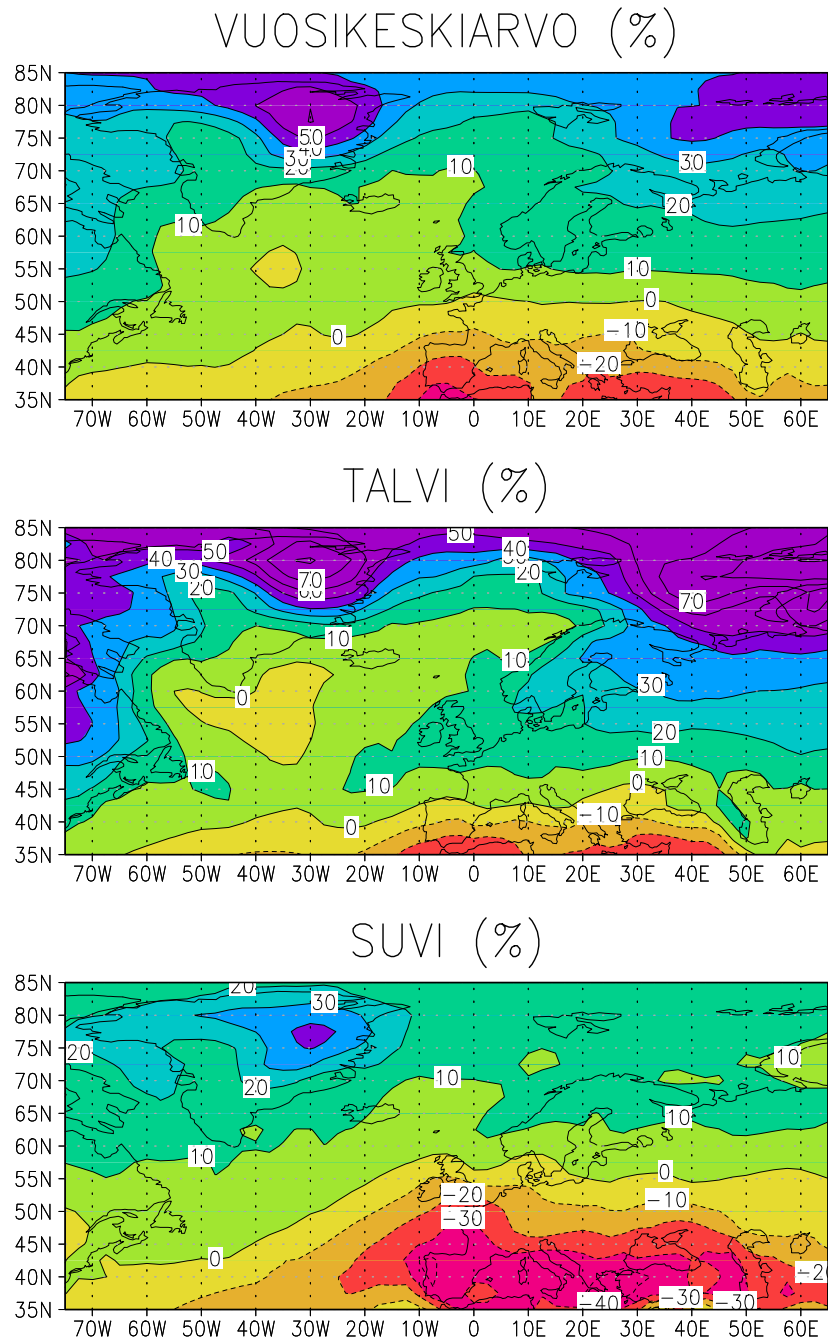
SADEMÄÄRÄN MUUTOKSEN ALUEELLINEN JAKAUMA

SADEMÄÄRÄN MUUTOS (2070–99)–(1971–2000)
A2–SKENAARIO, 19 MALLIN KESKIARVO



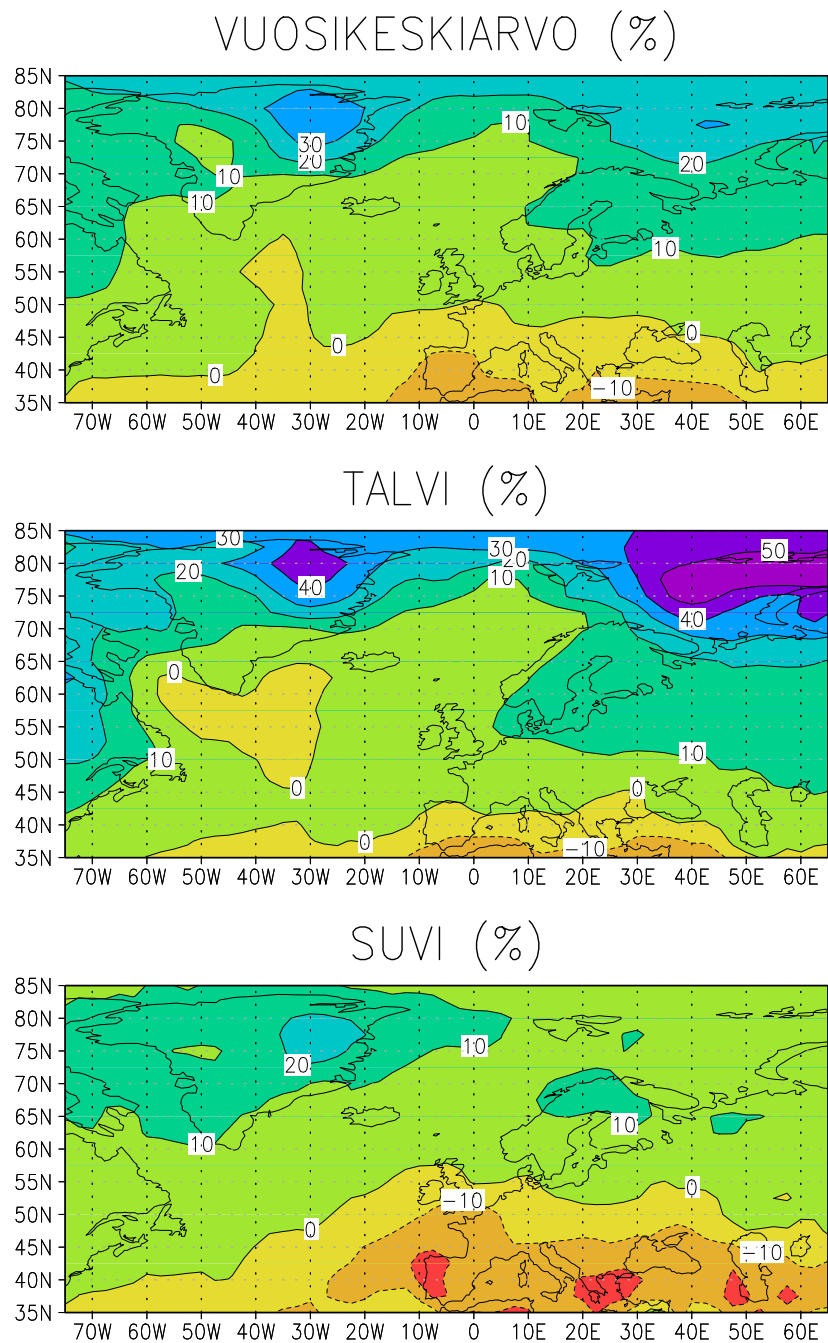
Kuva 9. Sademäärän ennustettu muutos (1971–2000 → 2070–2099) koko vuoden aikana keskimäärin (yläkuva), jouluihelmikuussa (keskimääräinen kuva) ja kesä-elokuussa (alakuva) Euroopan ja Pohjois-Atlantin alueella. Yksikkönä yläkuvassa mm/vuosi, keski- ja alakuvasa mm/kk. Muutokset on laskettu 19 maapallonlaajuisen ilmastomuutosmallin A2-skenaarioajojen keskiarvona.

**SADEMÄÄRÄN MUUTOS (2070–99)–(1971–2000)
A2–SKENAARIO, 19 MALLIN KESKIVARVO**



Kuva 10. Sademäärän ennustettu muutos (1971–2000 → 2070–2099, A2-skenaario) prosentteina ilmaistuna. Ks. kuvan 9 selitystekstiä.

**SADEMÄÄRÄN MUUTOS (2070–99)–(1971–2000)
B1–SKENAARIO, 19 MALLIN KESKIVARVO**



Kuva 11. Sademäärän ennustettu B1-skenaarion mukainen muutos (1971–2000 → 2070–2099) prosentteina ilmaistuna.

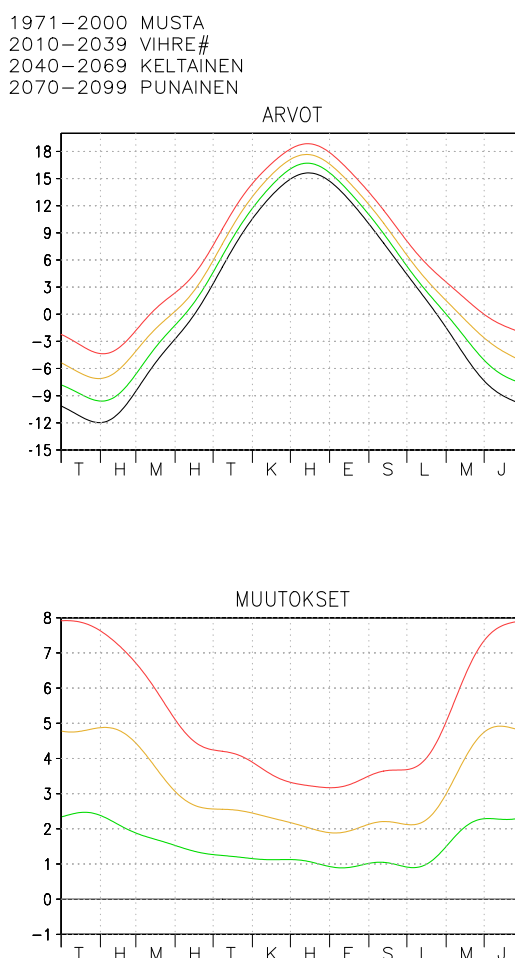
PÄÄTELMIÄ:

- Tulevaisuudessa Pohjois-Euroopassa näyttäisi satavan nykyistä enemmän, etelässä taas vähemmän. Keski-Euroopassa sateet vähenevät kesällä ja lisääntyvät talvella.
- Välimeren maissa sademäärien putoaminen on huolestuttavan suurta. A2-skenaarion toteutuessa vuotuinen sademäärä vähenee monilla alueilla yli 100 mm eli 20%:n verran. Kesällä suhteellinen pudotus on vieläkin jyrkempi, yli 30%.
- Huomattakoon, että sademäärän muutos ilmaistuna absoluuttisissa yksiköissä (kuva 9) ja prosentteina (kuva 10) näyttää aika erilaiselta: esimerkiksi millimetreinä sademäärä putoaa kesällä eniten Ranskan-Sveitsin tienoilla, suhteellisesti mitaten Välimeren alueella.
- Pohjois-Euroopassa kesäinen sademäärä näyttää kasvavan n. 10%. Tämä ei kuitenkaan välttämättä merkitse kuivuuden tuottamien ongelmien katoamisesta, mahdollisesti päin vastoin. Lämmenneessä ilmastossa nimittäin myös veden tarve lisääntyy haihdunnan voimistuessa.
- B1-skenaariossa sademäärien muutokset ovat pienempiä kuin A2-skenaariossa, mutta muutosten maantieteellinen jakauma on aika samanlainen.

LÄMPÖTILAN VUOTUINEN KULKU NYT JA TULEVAISUUDESSA

Lämpötilan klimatologinen vuotuinen kulku jokaisena vuoden päivänä laskettiin sovittamalla Fourier-kehitemmä lämpötilojen kuukausikeskiarvoihin. Fourier-sovituksessa käytettiin tähän tarkoitukseen viritettyä versiota alkujaan Jouni Räisäsen (Helsingin yliopisto, Fysikaalisten tieteitten laitos) laatimasta algoritmista, jonka avulla on laskettu mm. Yliopiston almanakassa (2007, siv. 50-51) julkaistut päivittäiset lämpötilat.

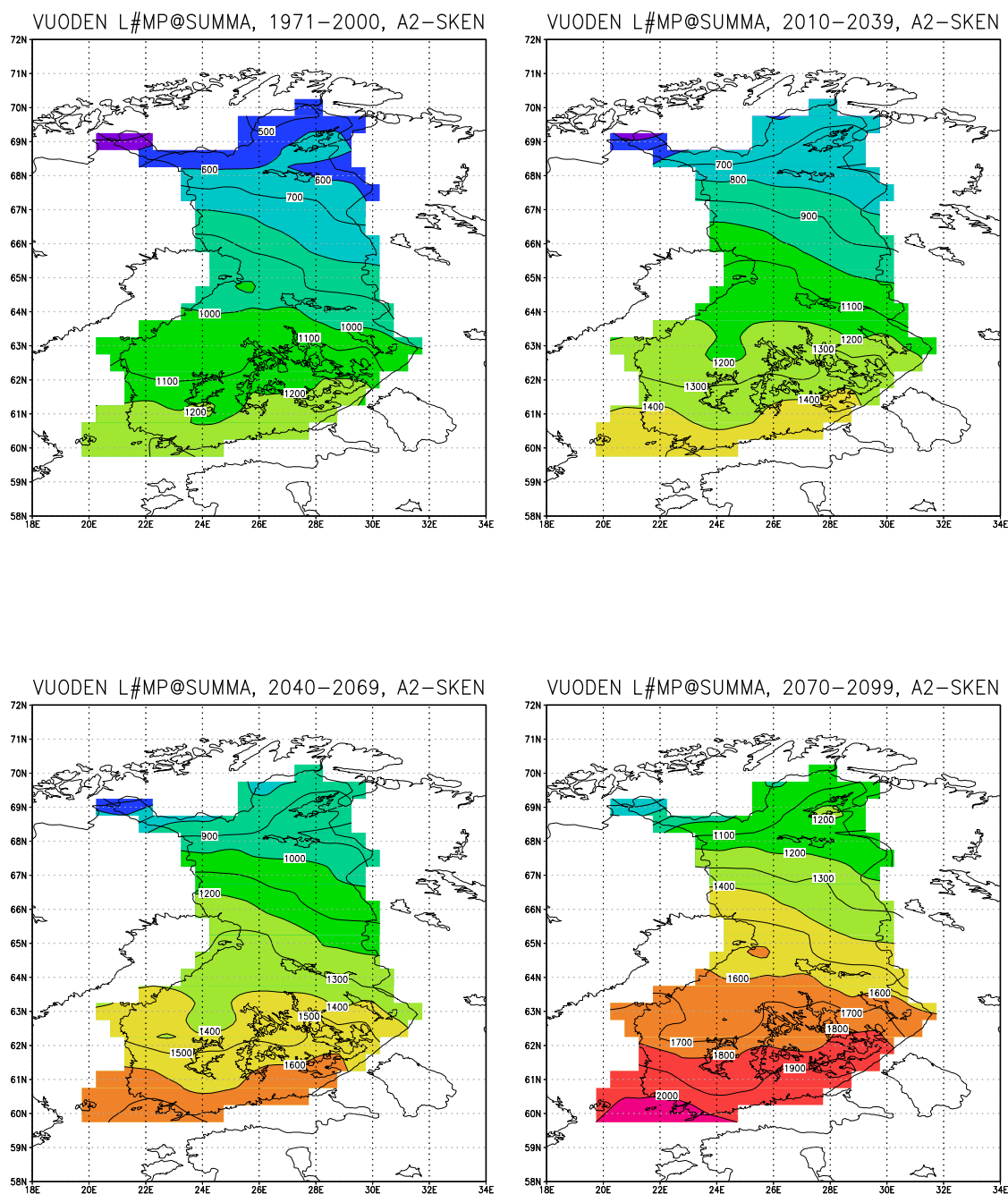
Aluksi laskettiin lämpötilan vuotuinen kulku perusjaksolle tiheässä ($0.5 \times 0.5^\circ$) Suomen kattavassa hilassa suoraan havaituista kuukausikeskilämpötiloista. Nämä lämpötilajakaumat saatiin Pentti Piriseltä (Ilmatieteen laitos, Ilmastopalvelu). Sen jälkeen jokaisessa hilapisteessä lisättiin havaittuihin lämpötiloihin 19 ilmastomuutosmallin tulosten keskiarvona saatu lämpötilan muutos. Näistä keskilämpötiloista laskettiin tulevaa ilmastoa kuvaavat lämpötilan vuosikulut. Kuvassa 12 on annettu esimerkkinä näin laskettuja lämpötiloja keskellä Suomea Oulujärven pohjoispuolella sijaitsevassa hilapisteessä.



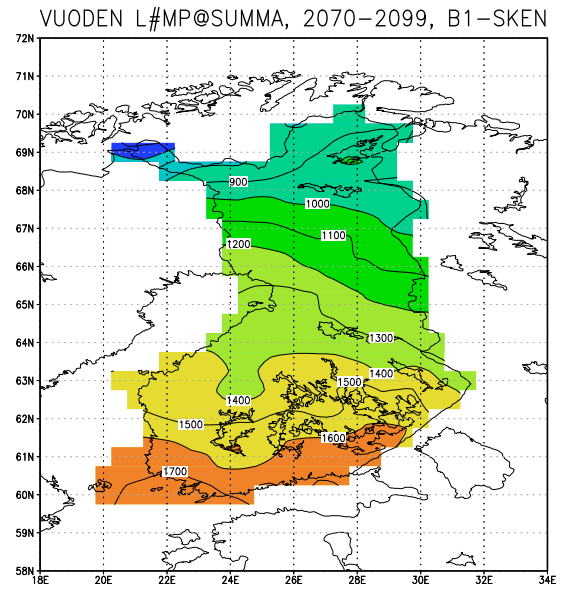
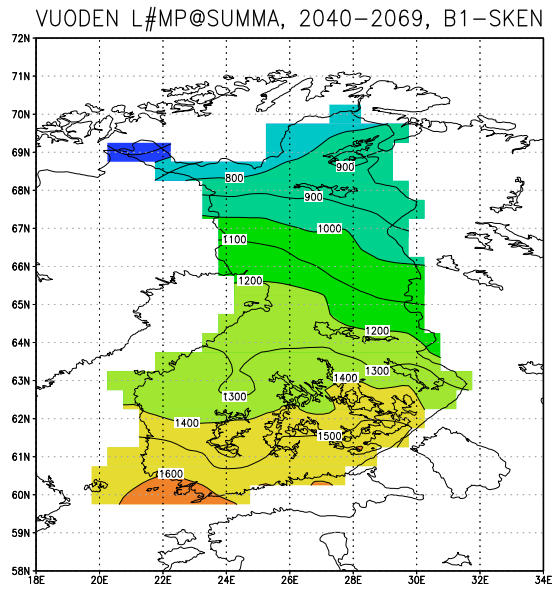
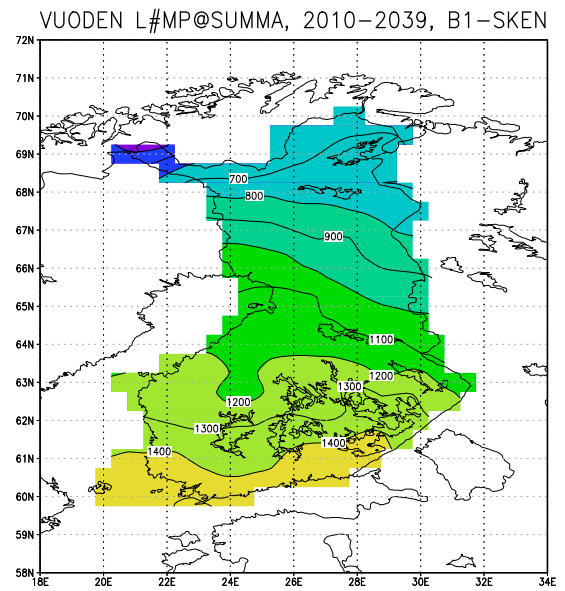
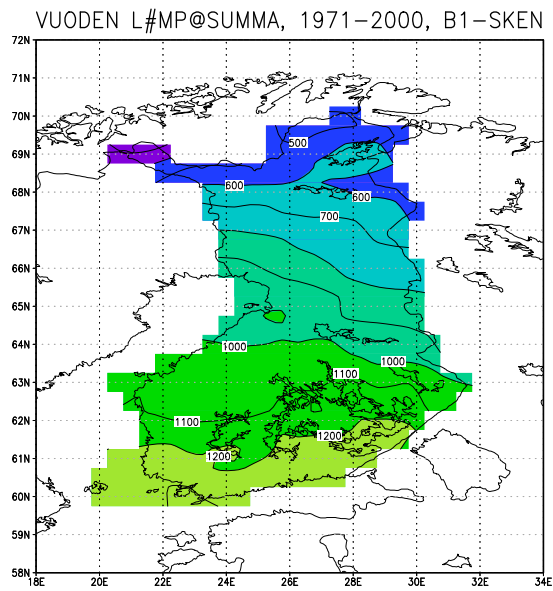
Kuva 12. Yläkuva: Lämpötilan havainnoista johdettu vuotuinen kulku hilapisteessä 64.75°N , 27.25°E jaksolle 1971–2000 (musta käyrä) sekä ns. delta-menetelmällä (havaittuihin arvoihin lisätty 19 ilmastomuutosmallin ennustama muutos) saadut vastaavat lämpötilat jaksoille 2010–39 (vihreä käyrä), 2040–69 (keltainen käyrä) ja 2070–99 (punainen käyrä). Alakuva: Lämpötilan ennustettu muutos perusjaksoon 1971–2000 verrattuna; samat tarkastelujaksot. Arviot perustuvat A2-skenaariin mukaisiin malliajoihin.

KASVUKAUDEN LÄMPÖSUMMAT NYT JA TULEVAISUUDESSA

Kasvukaudeksi tulkitaan tässä yksinkertaisesti se osa vuotta, jolloin Fourier-kehitemän mukainen vuorokauden keskilämpötila (kuva 12) on korkeampi kuin $+5^{\circ}\text{C}$. Kasvukauden lämpösumma saadaan laskettua vähentämällä jokaisen kasvukauden päivän vuorokauden keskilämpötilasta 5°C ja laskemalla näin saadut lämpötilajäännökset yhteen.

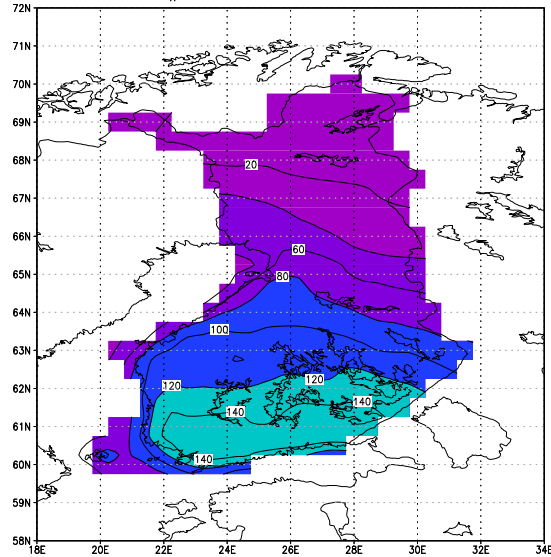


Kuva 13. Havaintoihin perustuva koko vuoden lämpösumma Suomessa vv. 1971-2000 sekä delta-menetelmällä (malli- ja havaintotietojen yhdistely) saatu A2-skenaariön mukainen lämpösumma vv. 2010-39, 2040-69 ja 2070-99. Yksikkö astepäiviä ($^{\circ}\text{Cvrk}$).

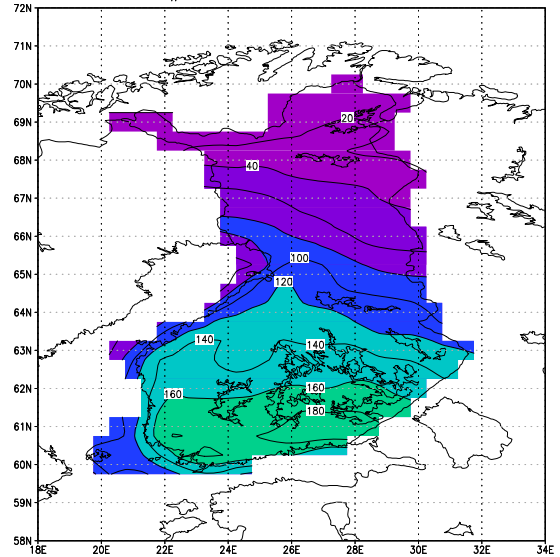


Kuva 14. B1-skenaariön mukaiset vuotuiset lämpösummat; ks. kuvan 13 selitystekstiä.

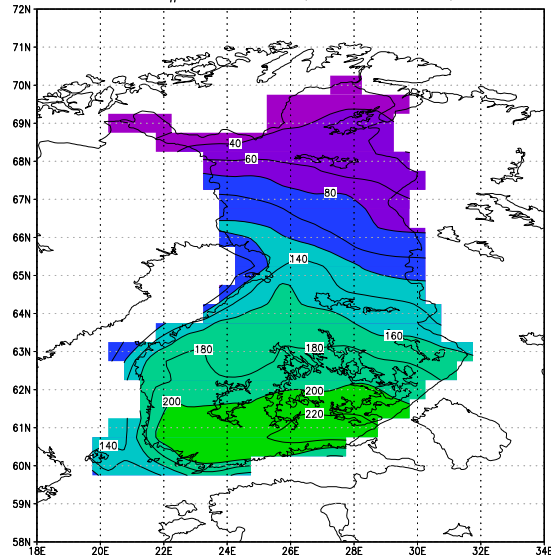
TOUKOKUUN L#MP@SUMMA, 1971–2000, A2-SKEN



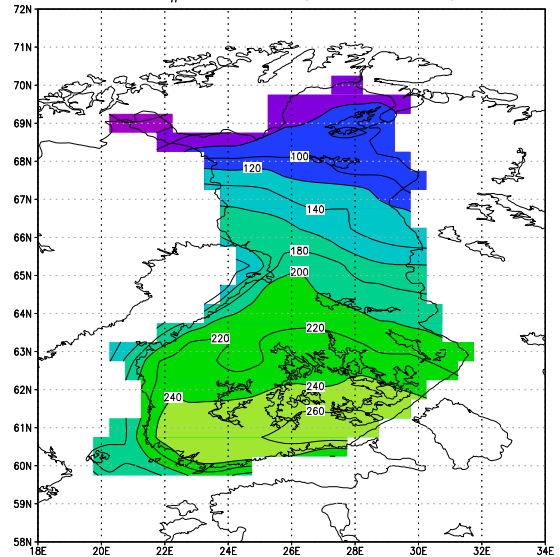
TOUKOKUUN L#MP@SUMMA, 2010–2039, A2-SKEN



TOUKOKUUN L#MP@SUMMA, 2040–2069, A2-SKEN

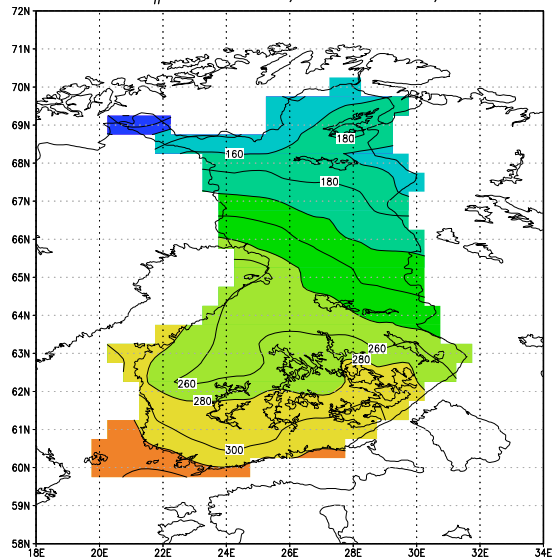


TOUKOKUUN L#MP@SUMMA, 2070–2099, A2-SKEN

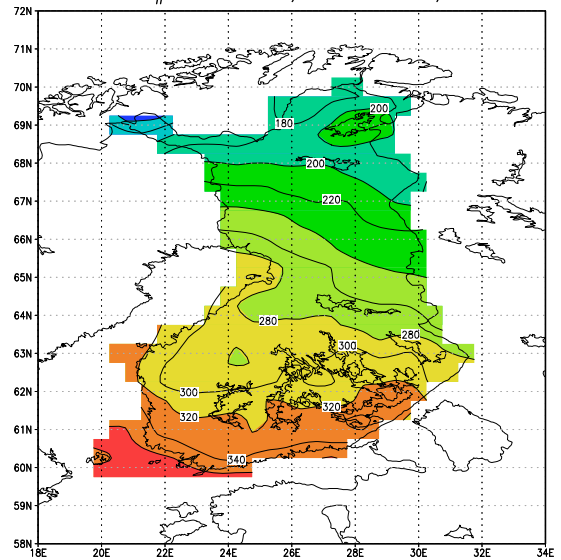


Kuva 15. Se osa vuotuisesta lämpösummasta, joka kertyy toukokuun aikana; tulevat lämpötilat saatu A2-skenaariota vastaavista malliajoista. Tarkastelujaksot 1971-2000, 2010-39, 2040-69 ja 2070-99. Yksikkö astepäiviä ($^{\circ}\text{Cvrk}$).

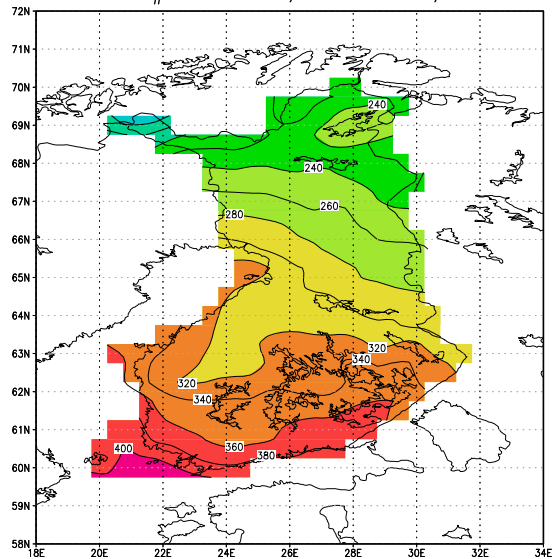
ELOKUUN L#MP@SUMMA, 1971–2000, A2-SKEN



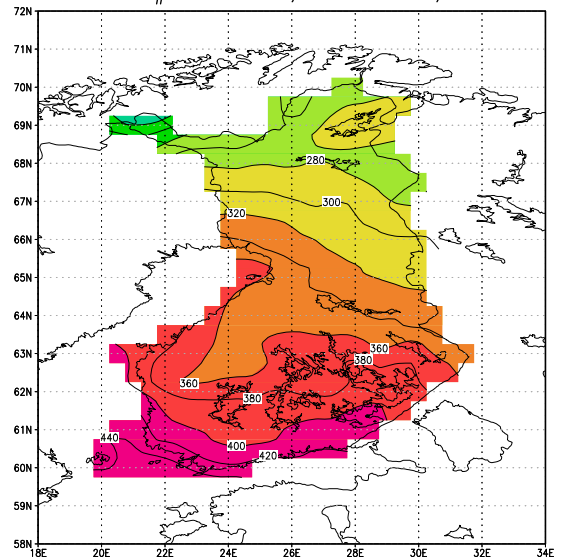
ELOKUUN L#MP@SUMMA, 2010–2039, A2-SKEN



ELOKUUN L#MP@SUMMA, 2040–2069, A2-SKEN



ELOKUUN L#MP@SUMMA, 2070–2099, A2-SKEN



Kuva 16. Elokuun aikana kertynyt lämpösumman osuus; ks. kuvan 15 selitystekstiä.

PÄÄTELMIÄ:

- Mikäli kasvihuonekaasujen päästöt ovat runsaita (A2-skenaario), lämpösummat kasvavat todella huomattavasti (kuva 13). Vuosisadan lopulla lämpösumma on Keski-Lapissa samaa luokkaa kuin nykyisin Etelä-Suomessa (1200°Cvirk). Pohjanmaan tuleva lämpösumma (n. 1600°Cvirk) vastaisi nykyistä Tanskaa, Etelä-Suomen sisämaan 1900°Cvirk nykyistä Belgiaa.
- Vaikka päästöt olisivat pieniäkin (B1-skenaario, kuva 14), ilmasto lämpenisi niin paljon, että Oulun korkeudella lämpösummaa kertyisi vuosisadan lopulla yhtä paljon kuin nykyisin lounaissaaristossa.
- Kasvukauden alkupuolella sisämaassa on lämpöisempää kuin rannikolla. Tämä näkyy kauniisti toukokuun lämpösummissa (kuva 15). Näin kasvukauden alussa lämpösumman suhteellinen lisäys ilmaston lämmitessä on vieläkin suurempi kuin koko kasvukautta tarkasteltaessa.
- Loppukesästä lämmennyt meri pitää rannikot sisämaata lämpimämpinä, ja siksi elokuussa eniten lämpösummaa kertyy eteläisillä rannikkoalueilla (kuva 16). Lämpösumman kasvu näkyy näissäkin kuvissa.

ILMASTONMUUTOS: ILOA VAI SURUA?

- Tässä esitettyjen mallitulosten perusteella näyttäisi siltä, että eteläisen Suomen ilmasto muistuttaisi vuosisadan lopulla nykyistä Keski-Eurooppaa. Ainakaan tällä aikamittakaavalla ei näyttäisi olevan pelkoa, että maamme muuttuisi ilmastoltaan mitenkään asuiskelvottomaksi. Esimerkiksi maataloudenharjoittajien kannalta olosuhteet näyttäisivät selvästi nykyisestä parantuvan.
- Kuitenkin ilmaston nopea muutos on kova rasitus luonnollemme. Monet maassamme nykyisin viihtyvät kasvi- ja eläinlajit katoavat ja uusia tulokkaita saadaan niitten tilalle. — Maailmanlaajuisesti luonto näyttäisi ilmaston muuttuessa kärsivän ankarasti, ja IPCC:n arvioitten mukaan jo n. 2°C maapallon keskilämpötilan nousu voi tappaa 20-30% maapallon eliölajeista sukupuuttoon.
- Vaikka meillä suomalaisilla ei näyttäisi hätää olevankaan, niin hyvin monissa kehitysmaissa ilmastonmuutos tulee aiheuttamaan suuria inhimillisiä kärsimyksiä, yhteiskuntien luhistumista ja ilmeisesti myös aseellisia konflikteja. Ei ole syytä tuudittautua siihen uskoon, että Suomikaan voisi katsella sivusta näitä ristiriitoja. Sotien ja satojen miljoonien ympäristöpakolaisten maailma on turvaton paikka elää. On aivan meidän itsekkäiden etujemmeakin mukaista, että ilmastonmuutosta kyettäisiin mahdollisimman tehokkaasti hillitsemään.