

# Korkeat ja matalat päivittäislämpötilat tulevassa ilmastossa

Jouni Räisänen, Helsingin yliopiston fysiikan laitos

Matti Kämäräinen, Helsingin yliopiston fysiikan laitos ja Ilmatieteen laitos

14.3.2013

## Sisällysluettelo

|  |    |
|--|----|
| Tiivistelmä .....  | 1  |
| 1. Johdanto .....  | 2  |
| 2. Aineisto ja menetelmät .....  | 4  |
| 3. Korkeiden ja alhaisten lämpötilojen yleisyys tulevaisuudessa .....      | 7  |
| 4. Kuinka lämmintä tai kylmää säätä tällä vuosisadalla voi esiintyä? ..... | 12 |
| 5. Yhteenveto .....  | 14 |
| Kirjallisuusviitteet.....  | 16 |

## Tiivistelmä

Kasvihuoneilmion voimistuessa muuttuu keskilämpötilan ohella myös korkeiden ja matalien päivittäisten lämpötilojen esiintyminen. Esimerkiksi kovien pakkasten tai hellepäivien yleisyyttä tulevaisuudessa ei siksi voida päätellä suoraan tähänastisista havainnoista. Toisaalta sitä ei voida myöskään arvioida suoraan ilmastomallisimulaatioista, koska mallien simuloima nykyinen keskilämpötila, lämpötilan vaihtelu ja lämpötilajakauman muoto eroavat usein havaitusta. On siis yhdistettävä havaintojen ja ilmastomallien antama tieto. Se, millä tavoin mallitulokset ja havainnot kannattaisi yhdistää, ei kuitenkaan ole itsestään selvää.

Tässä raportissa arvioidaan korkeiden maksimi- ja matalien minimilämpötilojen esiintymistä Helsingissä, Jyväskylässä ja Sodankylässä alkaneella vuosisadalla, käyttäen hyväksi vuosien 1981-2010 havaittuja lämpötila-aikasarjoja ja EU:n ENSEMBLES-hankkeen alueellisten ilmastomallien tuloksia. Mallitulosten ja havaintojen yhdistämiseen käytetään kymmentä erilaista menetelmää. Kaikkiaan ilmastomallien erot vaikuttavat kuitenkin ennusteisiin yhdistämismenetelmien eroja enemmän, etenkin jos kaikkein karkeimmat menetelmät jätetään pois laskuista.

Ennustettu ilmaston lämpeneminen näkyy sekä korkeiden kesäaikaisten maksimilämpötilojen yleistymisenä että alhaisten talvisten minimilämpötilojen harvinaistumisena. Lähivuosikymmeninä (2011-2040) muutoksen suunta ei kuitenkaan ole vielä aivan yksikäsitteinen. Ennakoitu muutos on suhteessa suurin lämpötilajakauman ääripäissä. Toisaalta hyvin korkeiden ja hyvin matalien lämpötilojen tulevaa esiintymistiheyttä koskeviin arvioihin liittyy myös eri syistä huomattavasti enemmän epävarmuutta kuin kohtalaisen korkeiden ja matalien lämpötilojen esiintymiseen.

Kaikkein alimmat lämpötilat nousevat tämän vuosisadan aikana todennäköisesti enemmän kuin kaikkein korkeimmat lämpötilat. Hyvin harvinaisten, esimerkiksi kerran 30 vuodessa esiintyvien ääriämpötilojen muutoksiin liittyy kuitenkin paljon epävarmuutta, osaksi jo yksin niiden suuren luonnollisen vaihtelun takia.

# 1. Johdanto

Monissa käytännön sovelluksissa tarvitaan tietoa siitä, millaisia päivittäisiä lämpötiloja tulevaisuudessa voi esiintyä. Kasvihuoneilmion voimistumisen aiheuttaman ilmastomuutoksen takia tätä tietoa ei saada suoraan tähänastisista säähavainnoista, vaan hyväksi joudutaan käyttämään ilmastomallien tuloksia. Ilmastomalliajot eivät kuitenkaan riitä yksinään, koska jo mallien simuloima nykyilmasto eroaa todellisesta, havaitusta ilmastosta.

Ongelmaa havainnollistaa kuva 1. Ylimmässä kuvapaneelissa on 930 päivän (30 vuotta  $\times$  31 päivää) aikasarja havaituista vuorokauden minimilämpötiloista Helsingin Kaisaniemessä tammikuussa v. 1981-2010. Sen alapuolella nähdään vastaava aikasarja yhdestä EU:n ENSEMBLES-hankkeesta (van der Linden ja Mitchell 2009) tehdystä alueellisesta ilmastomalliajosta. Lämpötilat ovat mallissa keskimäärin selvästi havaittua alempia, ja myös niiden jakauma on muodoltaan erilainen. Havaittu jakauma on epäsymmetrinen, siten että alimmat lämpötilat ovat paljon kauempana keskiarvosta kuin korkeimmat (ns. vasemmalle vino jakauma). Sen sijaan simuloitujen lämpötilat jakautuvat lähes tasaisesti keskiarvonsa molemmin puolin. Kolmannella rivillä nähtävä, mallin vuosina 2069-2098 simuloimista tammikuun minimilämpötiloista koottu aikasarja ei näistä syistä sellaisenaan anna uskottavaa kuvaa lämpötilojen vaihtelusta kyseisen jakson aikana.

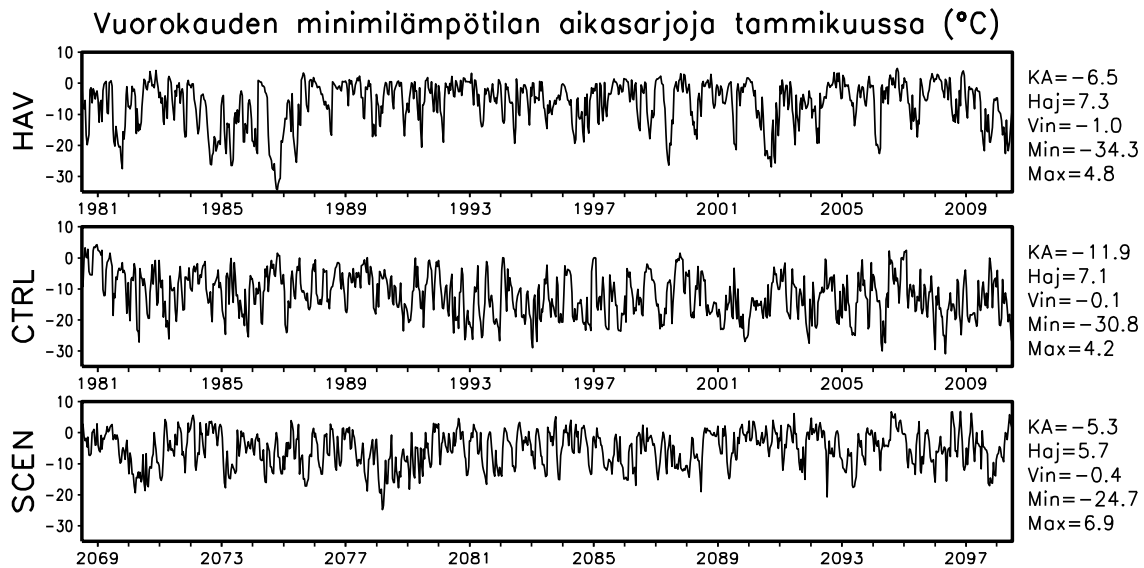
Parhaat arviot tulevasta ilmastosta saadaan yhdistämällä mallien ja havaintojen antama tieto. Yhdistämiseen on tarjolla kaksi erilaista lähestymistapaa. Niin kutsutuissa delta-menetelmissä (kuvan 2 yläpuolisko) perustaksi otetaan havaittua ilmastoa edustavat aikasarjat, joita muokataan mallien simuloimien ilmastomuutoksen perusteella. Harhankorjausmenetelmissä (kuvan 2 alapuolisko) tulevaisuutta arvioidaan ilmastomallin simuloiman tulevan ilmaston pohjalta, siten että mallisimulaation virheet pyritään korjaamaan simuloitujen ja havaitun tähänastisen ilmaston erojen perusteella.

Sekä delta- että harhankorjausmenetelmät voidaan toteuttaa monin eri tavoin. Yksinkertaisimmillaan voidaan ottaa huomioon vain keskiarvon muutos tai harha. Tällöin tulevaa ilmastoa edustava lämpötilan aikasarja saadaan siis joko lisäämällä sama vakio muutos kaikkiin havaintoaikasarjan päivittäislämpötiloihin (delta-menetelmä) tai tekemällä sama vakio korjaus kaikkiin tulevaa ilmastoa edustavan mallisimulaation lämpötiloihin (harhankorjausmenetelmä). Huomioon voidaan kuitenkin ottaa myös muutokset tai mallien ja havaintojen väliset erot lämpötilan vaihtelevuuden suuruudessa sekä (monin eri tavoin) lämpötilajakauman muodossa. Ei ole itsestään selvää, millä tavoin havaitun aikasarjan muokkaaminen tai mallisimulaation korjaaminen kannattaa tehdä.

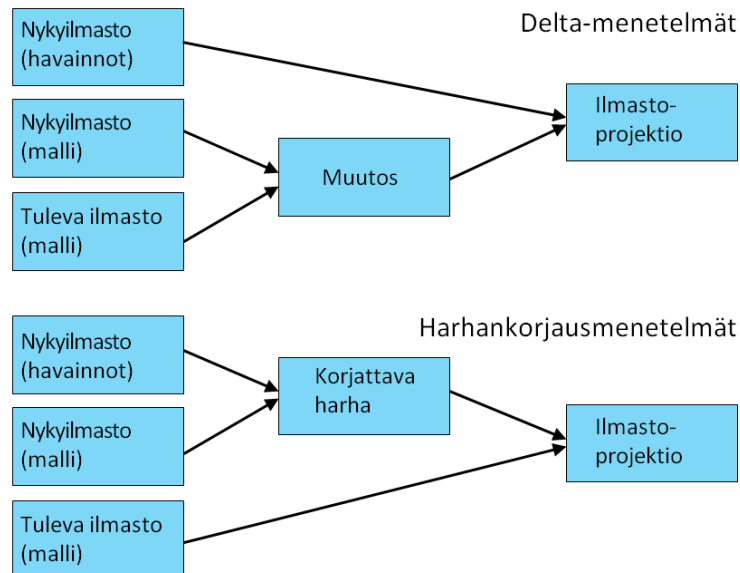
Tässä raportissa esitellään eri tavoin laadittuja arvioita päivittäisten lämpötilojen vaihtelusta Suomessa alkaneen vuosisadan aikana. Erityisesti tarkastelun kohteena on korkeiden kesäisten maksimilämpötilojen ja alhaisten talvien minimilämpötilojen esiintyminen. Tulosten esittelyssä käytetään kahta lähestymistapaa:

1. Luvussa 3 annetaan arvioita siitä, kuinka monena päivänä vuodessa tiettyjä raja-arvoja korkeampia maksimilämpötiloja ja alempia minimilämpötiloja esiintyy tulevaisuudessa. Arvioita laadittaessa ja niiden epävarmuutta luonnehdittaessa otetaan huomioon (i) vaihtelu kuuden ENSEMBLES-mallin välillä ja (ii) useiden erilaisten delta- ja harhankorjausmenetelmien antamat ennusteet.
2. Luvussa 4 tutkitaan kaikkein korkeimpien ja kaikkein alimpien lämpötilojen muuttumista tulevaisuudessa. Koska sekä havaitun lämpötilajakauman muokkaamiseen että mallitulosten korjaamiseen jakauman absoluuttisissa ääripäissä

liittyy hyvin paljon epävarmuutta, tyydytään tässä edellistä kohtaa kvalitatiivisempaan tarkastelutapaan. Ennusteita tulevien 30-vuotisjaksojen ääriämpötiloista ei siis anneta absoluuttisella asteikolla, vaan tutkitaan ainoastaan sitä, miten nämä lämpötilat malleissa eroavat perusjakson 1981-2010 vastaavista arvoista.



**Kuva 1.** 30-vuotiset aikasarjat tammikuun päivittäisten minimilämpötilojen vaihtelusta Helsingissä. HAV = havainnot v. 1981-2010; CTRL = ETHZ-H0-ilmastomallilla (ks. Taulukko 1) simuloidut lämpötilat v. 1981-2010; SCEN = samalla mallilla simuloidut lämpötilat v. 2069-2098, kun kasvihuonekaasut lisääntyvät SRES A1B-skenaarion mukaisesti. Kunkin kuvan oikealla puolella annetaan aikasarjan keskiarvo (KA), keskihajonta (HAJ), vinouskerroin (Vin) sekä minimi- ja maksimi-arvot (Min ja Max).



**Kuva 2.** Tulevaa ilmastoa kuvaavien ilmastoprojektioiden laatiminen delta- ja harhankorjausmenetelmiä käyttäen.

Kaikki tässä työssä käytetyt ilmastomallisimulaatiot perustuvat samaan päästöskenaarioon (SRES A1B). Siksi päästöjen kehittymiseen liittyvä epävarmuus ei tule tämän raportin

tuloksissa esiin. Koska käytettyjen ilmastomallisimulaatioiden lukumäärä (6 kappaletta) on suhteellisen pieni, ei myöskään mallitulosten vaihteluun liittyvä epävarmuus välttämättä näy tuloksissa täysmääräisesti.

## 2. Aineisto ja menetelmät

Laskelmat tehtiin kolmelle havaintoasemalle: Helsinki Kaisaniemi, Jyväskylän lentokenttä ja Sodankylän observatorio. Kullekin paikalle haettiin Ilmatieteen laitoksen tietokannasta vuorokauden maksimi-, minimi- ja keskilämpötilan päivittäiset aikasarjat vuosilta 1981-2010. Näitä havaintosarjoja käytettiin delta-menetelmissä tulevaa ilmastoa edustavien aikasarjojen pohjana ja harhankorjausmenetelmissä ENSEMBLES-hankkeen alueellisten ilmastomallisimulaatioiden lämpötilojen korjaamiseen.

***Taulukko 1.** Käytetyt alueelliset ilmastomallisimulaatiot. Maailmanlaajuisten ja alueellisten ilmastomallien sekä tutkimuslaitosten lyhenteet ovat verkkosivun <http://ensemblesrt3.dmi.dk/mukaisia>.*

| Reunaehdot antanut maailmanlaajuinen ilmastomalli | Alueellinen ilmastomalli | Tutkimuslaitos | Simulaation lyhenne tässä raportissa |
|---|--------------------------|----------------|--------------------------------------|
| ARPEGE  | ALADIN                   | CNRM           | CNRM-A                               |
| HadCM3Q0  | CLM                      | ETHZ           | ETHZ-H0                              |
| HadCM3Q3  | HadRM3Q3                 | Met Office     | METO-H3                              |
| HadCM3Q16   | HadRM3Q16                | Met Office     | METO-H16                             |
| ECHAM5-r3   | REMO                     | MPI            | MPI-E5                               |
| BCM   | RCA3                     | SMHI           | SMHI-BCM                             |

Tutkimuksessa käytettiin kuutta ENSEMBLES-hankkeen mallisimulaatiota (Taulukko 1). Simulaatiot valittiin siten, että ne olisivat mahdollisimman pitkälle toisistaan riippumattomia: kussakin niistä käytettiin eri alueellista ilmastomallia, ja alueellisten mallien tarvitsemat reunaehdot otettiin kuudelta eri maailmanlaajuiselta ilmastomallilta<sup>1</sup>. Kaikki alueelliset mallisimulaatiot on ajettu 25 km:n erotuskykyä käyttäen ja ne perustuvat SRES A1B - päästöskenaarioon (Nakićenović ym. 2000). Tämän skenaarion toteutuessa hiilidioksidin päästöt kasvaisivat vuoteen 2050 mennessä yli 16 hiiligigatonniin (GtC) vuodessa (nykyisin 10 GtC) ja putoaisivat vuoteen 2100 mennessä noin 13.5 GtC:hen vuodessa. Hiilidioksidin pitoisuus nousisi nykyiseltä runsaan 390 miljoonasosan (ppmv) tasoltaan vuoteen 2100 mennessä noin 700 ppmv:hen.

Kunkin havaintoaseman läheltä valittiin mallisimulaatioista yksi hilapiste edustamaan kyseistä paikkakuntaa. Koska Helsinki sijaitsee aivan rannikolla, valittiin tässä tapauksessa tarkoituksella hiukan kaupungin koillispuolella oleva piste (60.4°N, 25.1°E). Monissa malleissa lähimmäksi Helsinkiä osuva piste on pääosin vettä, ja lämpötilojen päivittäinen vaihtelu on tässä pisteessä aivan liian pientä.

<sup>1</sup> Tässä on laskettu eri malleiksi HadCM3-mallin versiot HadCM3Q0, HadCM3Q3 ja HadCM3Q6. Vaikka nämä kolme malliversiota pohjautuvat samaan perusmalliin, ovat niiden simuloimat ilmastomuutokset kuitenkin varsin erilaisia.

**Taulukko 2. Mallitulosten ja havaintojen yhdistämiseen käytetyt menetelmät.**

---

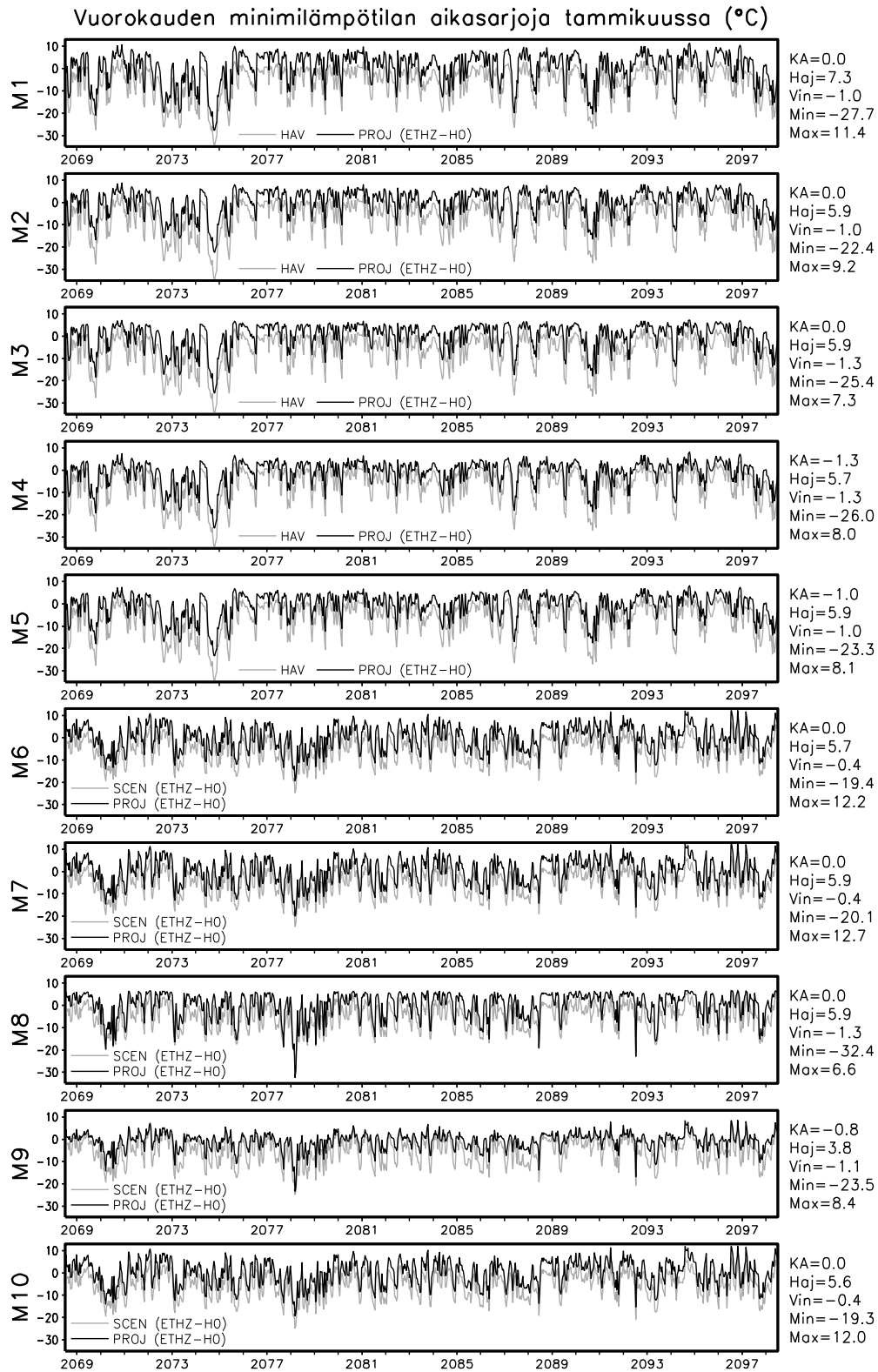
|     |  |
|-----|--|
| M1  | Delta: keskiarvon muutos   |
| M2  | Delta: keskiarvon ja keskihajonnan muutos                              |
| M3  | Delta: keskiarvon, keskihajonnan ja jakauman vinouden muutos           |
| M4  | Delta: kvantiili-kvantiili-muunnos prosenttipistekäyriä tasoittaen     |
| M5  | Delta: kvantiili-kvantiili-muunnos lineaarista regressiota käyttäen    |
| M6  | Harhankorjaus: keskiarvo   |
| M7  | Harhankorjaus: keskiarvon ja keskihajonta                              |
| M8  | Harhankorjaus: keskiarvo, keskihajonta ja jakauman vinous              |
| M9  | Harhankorjaus: kvantiili kvantiililta prosenttipistekäyriä tasoittaen  |
| M10 | Harhankorjaus: kvantiili kvantiililta lineaarista regressiota käyttäen |

---

Tulevia lämpötiloja arvioitaessa käytettiin yhteensä kymmentä eri menetelmää (Taulukko 2). Kaikissa menetelmissä ilmastonmuutos ja mallisimulaatioiden harhat määritettiin kullekin kalenterikuukaudelle erikseen. Kun siis esimerkiksi menetelmän M7 avulla tuotettiin aikasarjoja tammikuun päivittäisistä lämpötiloista tulevassa ilmastossa, otettiin lähtökohdaksi kunkin ilmastomallin kyseisen tulevaisuuden jakson aikana simuloimat tammikuun päivittäislämpötilat. Sitten näihin lämpötiloihin tehtiin vakiokorjaus perusjakson (1981-2010) simuloitujen ja havaitun keskilämpötilan eroa hyväksi käyttäen. Lopuksi aikasarjan vaihtelevuutta lisättiin tai vähennettiin samassa suhteessa kuin vuosina 1981-2010 havaittu lämpötilojen keskihajonta erosi mallin simuloimasta. Menetelmät kuvataan täsmällisemmin Räisäsen ja Rädyn (2012) artikkelissa sekä Kämäräisen (2013) pro gradu -työssä.

Kuvassa 3 nähdään esimerkit eri menetelmien avulla johdetuista tammikuun päivittäisten minimilämpötilojen aikasarjoista Helsingissä tämän vuosisadan lopulla (vuodet 2069-2098). Kaikissa tapauksissa on käytetty hyväksi samaa ilmastomallisimulaatiota, joten eri aikasarjojen erot johtuvat yksinomaan menetelmien eroista. Kuvasta nähdään mm. seuraavat asiat:

1. Delta-menetelmillä muodostettujen aikasarjojen rakenne seuraa vuosien 1981-2010 havaittua aikasarjaa, harhankorjausmenetelmien tapauksessa taas mallin vuosina 2069-2098 simuloimaa aikasarjaa.
2. Aikasarjojen keskiarvo on useimmissa tapauksissa sama eli havaitun keskiarvon ja mallin simuloiman keskimääräisen muutoksen summa. Kvantiili-kvantiili-periaatetta käyttäville menetelmille (M4, M5, M9 ja M10) tämä ei kuitenkaan päde, sillä niihin ei sisälly oletusta, että mallin simuloima keskiarvon muutos olisi välttämättä oikea. Eron syytä selitetään Räisäsen ja Rädyn (2012) artikkelin luvussa 3.
3. Menetelmä M1 olettaa lämpötilojen vaihtelevuuden pysyvän tulevaisuudessa ennallaan tähänastisen kaltaisena. Ylimmät ja alimmat lämpötilat nousevat siis yhtä paljon. Kaikkien muiden menetelmien antamien tulosten mukaan vuorokauden minimilämpötilat vaihtelisivat tulevaisuudessa tammikuussa nykyistä vähemmän.
4. Delta-menetelmistä vain M3 ja M4 pystyvät ottamaan huomioon lämpötilajakauman vinoudessa mahdollisesti tapahtuvat muutokset. Vastaavasti harhankorjausmenetelmistä vain M8 ja M9 huomioivat erot havaitusta ja simuloitusta tähänastisesta ilmastosta saatujen jakaumien vinoudessa. Kuvan 1 mukaan (1. ja 2. aikasarja) tarkasteltavan mallin lämpötilajakauma oli talvisaikaan liian symmetrinen. Sama siis pätee oletettavasti myös menetelmien M6, M7 ja M10 avulla lasketuille jakaumille.



**Kuva 3.** Tammikuun päivittäisten minimilämpötilojen aikasarjat Helsingissä vuosille 2069-2098 eri laskentamenetelmiä mutta samaa ilmastomallia (ETHZ-H0) hyväksi käyttäen. Ylimpiin viiteen kuvapaneeliin (delta-menetelmät) on merkitty harmaalla vertailukohtaksi vuosina 1981-2010 havaitut lämpötilat ja alimpiin viiteen paneeliin (harhankorjausmenetelmät) ETHZ-H0-mallin vuosina 2069-2098 simuloimat lämpötilat korjaamattomina. Kunkin kuvan oikealla puolella annetaan aikasarjan keskiarvo (KA), keskihajonta (HAJ), vinouskerroin (VIN) sekä minimi- ja maksimiarvot (MIN ja MAX).

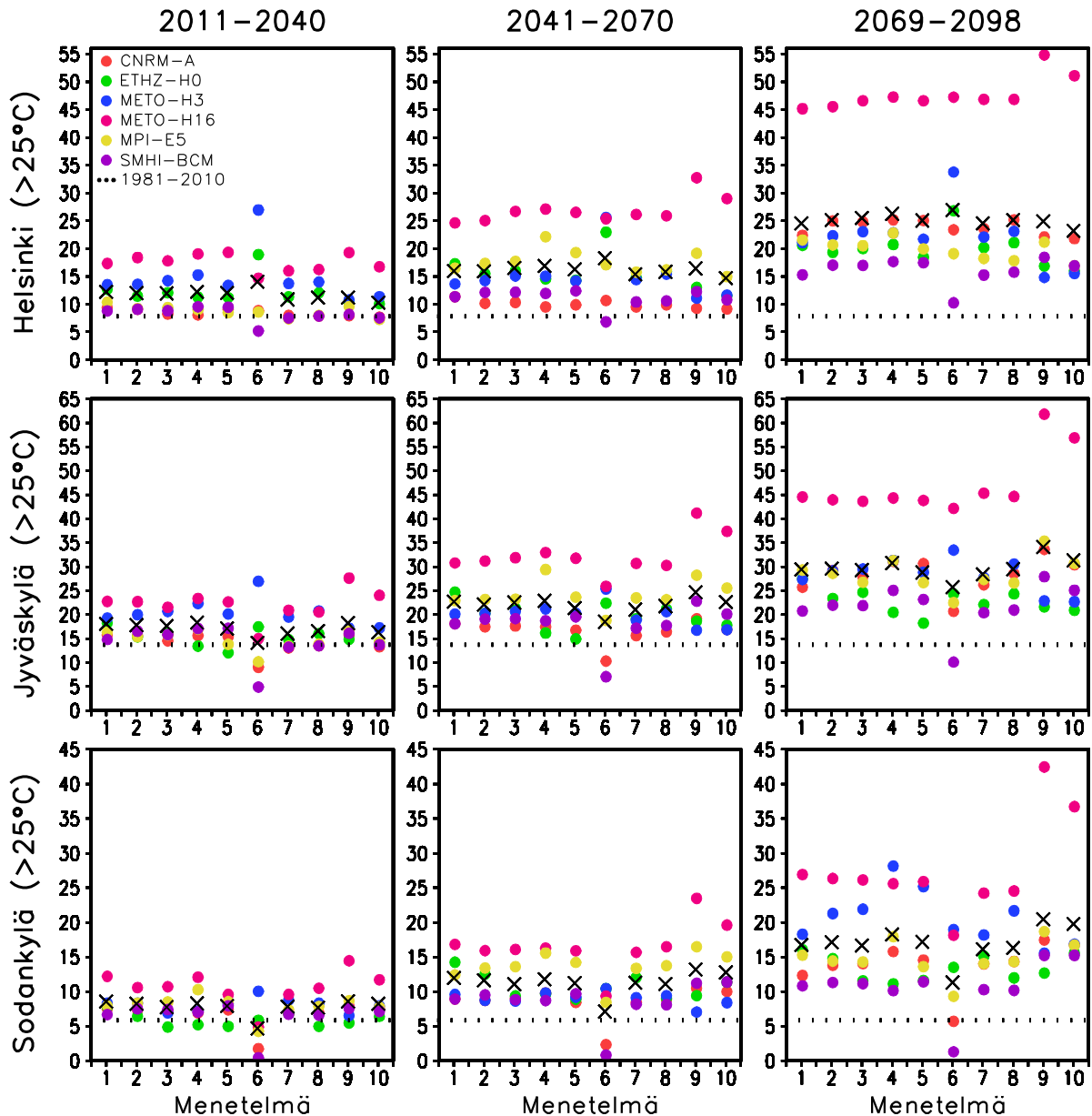
5. Kaikkein alimpia ja ylimpiä lämpötiloja koskevat ennusteet ovat erityisen herkkiä menetelmän valinnalle. Koko 30-vuotisen jakson alimman tammikuun minimilämpötilan vaihtelu alimmasta (M8:  $-32.4^{\circ}\text{C}$ ) ylimpään arvioon (M10:  $-19.3^{\circ}\text{C}$ ) on peräti 13 astetta, eikä tässä ole edes mukana ilmastomallien eroihin liittyvää epävarmuutta.

### 3. Korkeiden ja alhaisten lämpötilojen yleisyys tulevaisuudessa

Kuva 3 antoi esimerkkejä eri tavoin johdetuista tulevan ilmaston mahdollista päivittäistä vaihtelua kuvaavista aikasarjoista. Paremman kokonaiskuvan saamiseksi on kuitenkin paikallaan tarkastella, kuinka yleisesti korkeita ja alhaisia lämpötiloja näissä aikasarjoissa kaiken kaikkiaan esiintyy. Kuvissa 4 ja 5 otetaan siksi tarkasteltavaksi hellepäivien määrä ja kovan pakkasen päivien määrä. Molempien määrittelyssä käytetään Ilmatieteen laitoksen omaksumia raja-arvoja. Hellepäiviksi luetaan siis päivät, joina vuorokauden ylin lämpötila ylittää  $+25^{\circ}\text{C}$  ja kovan pakkasen päiviksi päivät, jolloin vuorokauden alin lämpötila alittaa Etelä-Suomessa (Helsinki)  $-15^{\circ}\text{C}$ , Keski-Suomessa (Jyväskylä)  $-20^{\circ}\text{C}$  ja Pohjois-Suomessa (Sodankylä)  $-25^{\circ}\text{C}$ .

Kuvassa 4 nähdään hellepäivien määrät kaikilla kolmella paikkakunnalla 30-vuotisjaksoina 2011-2040, 2041-2070 ja 2069-2098. Yleiskuva on selvä: ilmaston lämmitessä kasvihuonekaasujen lisääntyessä helteet yleistyvät. Eri mallit antavat kuitenkin muutoksen suuruudesta varsin erilaisia arvioita. Erityisen suurta lämpeneminen ja hellepäivien yleistyminen olisi METO-H16-mallin tulosten mukaan. Toisaalta vielä vuosina 2011-2040 hellepäivien määrä jäisi SMHI-BCM-mallin antaman arvion mukaan kaikilla kolmella paikkakunnalla hyvin lähelle tähänastista. Jyväskylässä ja Sodankylässä näin käy myös ETHZ-H0-mallin tapauksessa.

Kuten kuva 4 kertoo, arvio hellepäivien tulevasta määrästä riippuu myös siitä, millä menetelmällä havainnot ja mallitulokset yhdistetään. Kaikkiaan menetelmien välinen vaihtelu on kuitenkin selvästi mallien välistä vaihtelua pienempi. Jonkinmoinen poikkeus on menetelmä 6 (harhankorjaus siten, että vain keskiarvon virhe otetaan huomioon). Etenkin vuosina 2011-2040 mallienvälinen vaihtelu on suurempi tälle kuin muille menetelmille, ja Jyväskylässä ja Sodankylässä hellepäivien määrä jäisi tällöin useiden mallien mukaan tähänastista pienemmäksi. Aivan ilmeisesti menetelmä 6 on liian yksinkertainen, sillä se ei millään lailla ota huomioon eroja simuloidun ja havaitun lämpötilanvaihtelun suuruudessa.



**Kuva 4.** Hellepäivien (vuorokauden maksimilämpötila yli  $+25^{\circ}\text{C}$ ) keskimääräinen vuotuinen lukumäärä eri 30-vuotisjaksoina Helsingissä (ylärivi), Jyväskylässä (keskirivi) ja Sodankylässä (alin rivi). Kussakin kuvassa on kuuden alueellisen ilmastomallin tuloksista johdetut ennusteet (eriväriset pallukat) kymmenellä eri delta- tai harhankorjausmenetelmällä laskettuna (vaaka-akseli). Pisteviiva kertoo hellepäivien keskimääräisen havaitun lukumäärän vuosina 1981-2010.

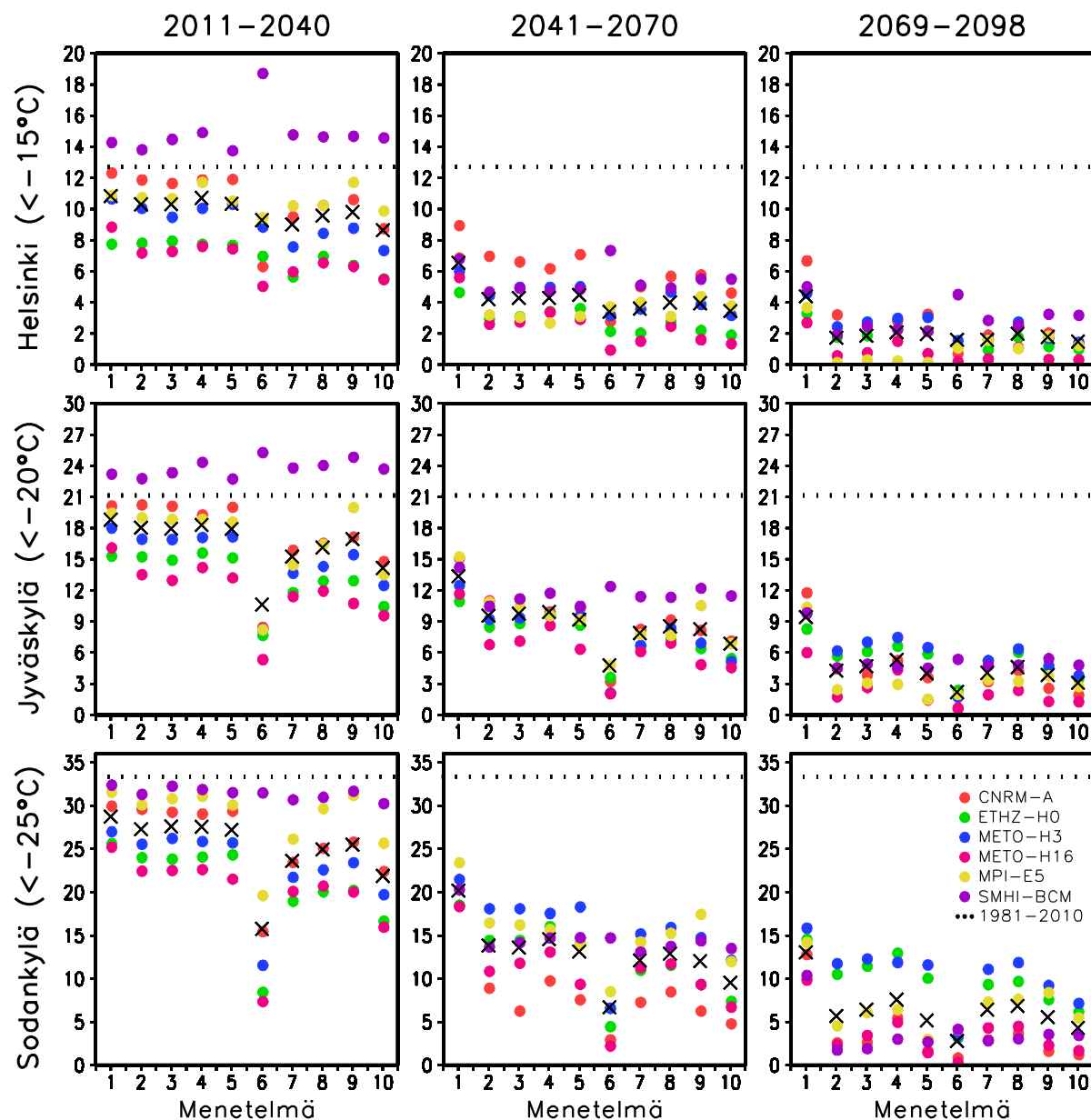
Talvien kaiken kaikkiaan leudontuessa kovat pakkaset harvinaistuvat (kuva 5). Poikkeuksena on kuitenkin taas ensimmäisen 30-vuotisjakson aikana SMHI-BCM-malli, jonka mukaan kovia pakkasia esiintyisi vuosina 2011-2040 Helsingissä ja Jyväskylässä jopa useammin kuin 1981-2010. Tämä tulos on laskentamenetelmästä riippumaton. Kaiken kaikkiaan Etelä- ja Keski-Suomen talvet ovat tässä mallissa vuosina 2011-2040 hiukan viileämpiä kuin 1981-2010.

Menetelmä 6 erottuu taas muista varsinkin jakson 2011-2040 aikana. Mallienvälinen vaihtelu on silloin tälle menetelmällä suuri, ja etenkin Jyväskylässä ja Sodankylässä se ennustaa useimmissa tapauksissa selvästi pienempää kylmien päivien määrää kuin muut menetelmät.



Useimmat mallit aliarvioivat talvilämpötilojen vaihtelua näillä paikkakunnilla, ja siksi pelkkä keskiarvon korjaus johtaa aivan ilmeisesti liian pieneen arvioon kylmien päivien määrästä.

Kuvassa 5 myös menetelmä 1 erottuu muista, erityisesti kahden viimeisen 30-vuotisjakson aikana. Tämä ennen yleisesti käytetty delta-menetelmä ottaa huomioon vain keskilämpötilan muutoksen. Se ei ota huomioon mallien simuloimaa talvilämpötilojen vaihtelun pienenemistä, jonka takia kylmät päivät vähenevät nopeammin kuin keskilämpötilan nousu yksinään edellyttäisi.



**Kuva 5.** Kovan pakkasen päivien (vuorokauden minimilämpötila Helsingissä alle  $-15^{\circ}\text{C}$ , Jyväskylässä alle  $-20^{\circ}\text{C}$  ja Sodankylässä alle  $-25^{\circ}\text{C}$  yli  $+25^{\circ}\text{C}$ ) keskimääräinen vuotuinen lukumäärä eri 30-vuotisjaksoina Helsingissä (ylärivi), Jyväskylässä (keskirivi) ja Sodankylässä (alin rivi). Kussakin kuvassa on kuuden alueellisen ilmastomallin tuloksista johdetut ennusteet (eriväriset pallukat) kymmenellä eri delta- tai harhankorjausmenetelmällä laskettuna (vaaka-akseli). Pisteiviiva kertoo kovan pakkasen päivien keskimääräisen havaitun lukumäärän vuosina 1981-2010.

Yhteenvedona voidaan todeta, että menetelmät 1 ja 6 ovat liian yksinkertaisia. Muita menetelmiä on vaikeampi panna paremmuusjärjestykseen. Räisänen ja Rätty (2012) lähestyivät ongelmaa mallien välistä ns. ristiverifiointitekniikkaa käyttäen, tarkastellen päivittäisiä lämpötiloja laajemmin koko Euroopan alueella. Heidän tulostensa mukaan menetelmä 9 näyttäisi kaikkiaan olevan yksittäisistä menetelmistä paras, muttei kuitenkaan kaikkialla eikä kaikissa tilanteissa. Valinta eri delta- ja harhankorjausmenetelmien välillä ei siis ole yksikäsitteinen, vaan niiden välinen ennusteiden vaihtelu muodostaa samankaltaisen (joskin sentään yleensä pienemmän) epävarmuustekijän kuin eri ilmastomallien tulosten vaihtelu. Luontevin tapa käsitellä tätä epävarmuutta on ottaa huomioon eri delta- ja harhankorjausmenetelmien tulokset samanaikaisesti, kuitenkin huonoimmiksi arvioidut menetelmät 1 ja 6 pois jättäen<sup>2</sup>.

Tarkempaa numeerista tietoa korkeiden ja matalien lämpötilojen esiintymisestä on koottu taulukoihin 3-5. Näissä taulukoissa parasta arviota edustaa kuuden mallin ja kahdeksan eri menetelmän (2-5 ja 7-10) tulokset yhdistämällä saatujen 48 vaihtoehdon keskiarvo, epävarmuusväliä taas vaihteluväli näiden 48 vaihtoehdon välillä. Koska nämä 48 arviota eivät ole toisistaan riippumattomia, ei voida helposti laskea, millä todennäköisyydellä todelliset kylmien tai lämpimien päivien määrät jäisivät välin ulkopuolelle. Räisänen ja Rädyn (2012) ristiverifiointilaskelmien mukaan tämä todennäköisyys voisi olla 15 %:n suuruusluokkaa, edellyttäen että tarkasteltua kuutta mallisimulaatiota voidaan pitää keskenään riippumattomina. Tämä oletus on liian optimistinen ainakin vuosisadan loppupuolella, jolloin ilmastomallien välisen vaihtelun ohella myös eri päästöskenaarioiden väliset erot kasvavat suuriksi.

**Taulukko 3.** Korkeiden maksimilämpötilojen ja alhaisten minimilämpötilojen keskimääräiset vuotuiset lukumäärät Helsingissä. Ensimmäinen sarake antaa havaitut lukumäärät vuosina 1981-2010, kolme seuraavaa mallitulokset ja havainnot yhdistämällä johdetut ennusteet vuosille 2011-2040, 2041-2070 ja 2069-2098. Näissä sarakkeissa ensimmäinen, lihavoitu luku kertoo mallitulosten keskiarvon ja sen perässä suluisissa olevat luvut vaihteluvälin, kun on otettu huomioon yhteensä 48 eri malli-menetelmä-yhdistelmää (ks. teksti). Punaista (sinistä) varjostusta on käytetty silloin, kun näin saadun epävarmuusvälin alaraja on havaittua arvoa suurempi (yläraja havaittua arvoa pienempi). Kun tietyn rajan ylä- tai alapuolisia lämpötiloja esiintyy koko 30-vuotiskauden aikana vain osassa 48 aikasarjasta, on myös ilmoitettu kyseisiä lämpötiloja sisältävien aikasarjojen prosenttiosuus. Jos ilmiötä ei ole lainkaan havaittu vuosina 1981-2010, kyseinen taulukon ruutu on jätetty tyhjäksi.

|                                  | 1981-2010   | 2011-2040                | 2041-2070                | 2069-2098                |
|----------------------------------|-------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| $T_{\max} > 35^{\circ}\text{C}$  |             | <b>0.0</b> (0.0-0.3) 10% | <b>0.0</b> (0.0-0.1) 4%  | <b>0.1</b> (0.0-0.6) 33% |
| $T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$  | <b>0.1</b>  | <b>0.6</b> (0.0-2.2)     | <b>1.1</b> (0.0-3.5)     | <b>2.9</b> (0.2-9.3)     |
| $T_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$  | <b>7.9</b>  | <b>11.5</b> (7.5-19.5)   | <b>16.0</b> (9.4-32.9)   | <b>25.0</b> (15.0-55.0)  |
| $T_{\min} < -15^{\circ}\text{C}$ | <b>12.7</b> | <b>9.8</b> (5.5-15.0)    | <b>4.0</b> (1.4-7.1)     | <b>1.8</b> (0.2-3.3)     |
| $T_{\min} < -20^{\circ}\text{C}$ | <b>3.7</b>  | <b>3.0</b> (0.8-5.9)     | <b>0.8</b> (0.1-1.7)     | <b>0.3</b> (0.0-0.8) 92% |
| $T_{\min} < -25^{\circ}\text{C}$ | <b>0.7</b>  | <b>0.6</b> (0.1-2.0)     | <b>0.1</b> (0.0-0.3) 85% | <b>0.1</b> (0.0-0.2) 52% |
| $T_{\min} < -30^{\circ}\text{C}$ | <b>0.2</b>  | <b>0.1</b> (0.0-0.3) 69% | <b>0.0</b> (0.0-0.1) 38% | <b>0.0</b> (0.0-0.0) 6%  |

<sup>2</sup> Ristiverifiointitulostensa perusteella Räisänen ja Rätty (2012) päätyivät tulokseen, että ”optimaalinen” menetelmäjoukko sisältäisi menetelmät 4, 5, 9 ja 10. Tässä raportissa otetaan kuitenkin mukaan myös menetelmät 2, 3, 7 ja 8, koska näin ennusteiden epävarmuus saadaan katettua hiukan paremmin.

**Taulukko 4.** Korkeiden vuorokauden maksimilämpötilojen ja alhaisten vuorokauden minimilämpötilojen esiintymistiheys Jyväskylässä (lisää yksityiskohtia taulukon 3 selitystekstissä).

|                                  | 1981-2010   | 2011-2040                | 2041-2070                | 2069-2098                |
|----------------------------------|-------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| $T_{\max} > 35^{\circ}\text{C}$  |             | <b>0.1</b> (0.0-0.6) 50% | <b>0.1</b> (0.0-0.4) 71% | <b>0.4</b> (0.0-2.0) 85% |
| $T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$  | <b>0.5</b>  | <b>1.7</b> (0.2-4.7)     | <b>2.8</b> (0.6-7.2)     | <b>5.5</b> (1.3-14.8)    |
| $T_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$  | <b>13.7</b> | <b>17.2</b> (12.3-27.8)  | <b>22.4</b> (15.1-41.4)  | <b>30.2</b> (18.4-62.0)  |
| $T_{\min} < -20^{\circ}\text{C}$ | <b>21.1</b> | <b>16.8</b> (9.7-24.9)   | <b>8.8</b> (4.7-12.3)    | <b>4.2</b> (1.4-7.6)     |
| $T_{\min} < -25^{\circ}\text{C}$ | <b>9.3</b>  | <b>6.8</b> (2.4-11.4)    | <b>2.6</b> (0.6-4.8)     | <b>1.1</b> (0.0-2.3) 96% |
| $T_{\min} < -30^{\circ}\text{C}$ | <b>2.5</b>  | <b>2.1</b> (0.6-4.6)     | <b>0.6</b> (0.0-2.5) 98% | <b>0.2</b> (0.0-1.1) 79% |
| $T_{\min} < -35^{\circ}\text{C}$ | <b>0.5</b>  | <b>0.5</b> (0.0-2.6) 96% | <b>0.1</b> (0.0-1.0) 35% | <b>0.0</b> (0.0-0.4) 17% |

**Taulukko 5.** Korkeiden vuorokauden maksimilämpötilojen ja alhaisten vuorokauden minimilämpötilojen esiintymistiheys Sodankylässä (lisää yksityiskohtia taulukon 3 selitystekstissä).

|                                  | 1981-2010   | 2011-2040                | 2041-2070                | 2069-2098                |
|----------------------------------|-------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| $T_{\max} > 35^{\circ}\text{C}$  |             | <b>0.1</b> (0.0-0.3) 13% | <b>0.0</b> (0.0-0.3) 25% | <b>0.2</b> (0.0-2.0) 54% |
| $T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$  | <b>0.1</b>  | <b>0.5</b> (0.0-2.1)     | <b>1.1</b> (0.2-2.3)     | <b>2.6</b> (0.2-7.0)     |
| $T_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$  | <b>5.9</b>  | <b>8.1</b> (5.0-14.6)    | <b>11.8</b> (7.2-23.6)   | <b>17.8</b> (10.3-42.6)  |
| $T_{\min} < -25^{\circ}\text{C}$ | <b>33.4</b> | <b>25.7</b> (16.1-32.4)  | <b>12.7</b> (4.9-18.4)   | <b>6.0</b> (1.3-13.1)    |
| $T_{\min} < -30^{\circ}\text{C}$ | <b>15.8</b> | <b>11.6</b> (5.9-17.2)   | <b>3.8</b> (0.8-7.1)     | <b>1.6</b> (0.0-4.6) 96% |
| $T_{\min} < -35^{\circ}\text{C}$ | <b>4.0</b>  | <b>3.3</b> (0.8-8.3)     | <b>0.9</b> (0.0-4.2) 94% | <b>0.4</b> (0.0-1.8) 71% |
| $T_{\min} < -40^{\circ}\text{C}$ | <b>0.7</b>  | <b>0.7</b> (0.1-4.1)     | <b>0.2</b> (0.0-1.8) 71% | <b>0.1</b> (0.0-0.6) 42% |

Taulukoiden tarkastelu paljastaa mm. seuraavat asiat:

1. Ajan myötä korkeat lämpötilat yleistyvät ja alhaiset harvinaistuvat. Parhaan arvion mukaan esimerkiksi Jyväskylässä vuotuisten hellepäivien ( $T_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$ ) lukumäärä kasvasi vuosina 1981-2010 havaituista vajaasta 14 päivästä 17 päivään vuosina 2011-2040, 22 päivään 2041-2070 ja 30 päivään v. 2069-2098. Vastaavasti yli 20 asteen pakkasten osuus pieneni 21 päivästä (1981-2010) vähitellen 17 / 9 / 4 päivään vuodessa (2011-2040 / 2041-2070 / 2069-2098).
2. Suhteellisesti eniten yleistyvät kaikkein korkeimmat lämpötilat. Hellepäivien kokonaismäärä kasvasi edellä mainittujen lukujen mukaan Jyväskylässä tämän vuosisadan aikana vain hiukan yli kaksinkertaiseksi, mutta kovien helteiden (yli  $30^{\circ}\text{C}$ ) osuus yli kymmenkertaistui (0.5 päivää vuodessa 1981-2010, 5.5 päivää vuodessa 2069-2098). Vastaavasti parhaan arvioin mukaan yli 30 asteen pakkasten määrä putoaisi Jyväskylässä vuosisadan loppuun mennessä vain kymmenesosaan tähänastisesta.
3. Ennusteiden absoluuttinen ja suhteellinen epävarmuus kasvaa ajan myötä, ilmastomallien välisten erojen kasvaessa yhä suuremmiksi. Suhteellisesti ottaen epävarmimpia ovat kaikkein korkeimpien ja alhaisimpien lämpötilojen tulevat esiintymisfrekvenssit. Ääri-ilmiöiden esiintyminen on herkkä sekä ilmastomallien välisille eroille että ilmaston satunnaiselle vaihtelulle, ja kaikkein korkeimmista ja alimmista lämpötiloista saatuihin arvioihin vaikuttaa myös suuresti tapa, jolla mallitulokset ja havainnot yhdistetään (vrt. kuva 3).
4. Kun mittana käytetään 48 vaihtoehdoisen lämpötilaskenaarion yksimielisyyttä muutoksen suunnasta, näkyy muutos varmimmin suhteellisen ”mietojen” ääriämpötilojen esiintymisessä. Esimerkiksi Sodankylässä yli  $-25^{\circ}\text{C}$ :n pakkaspäivien

kokonaismäärä on jo vuosina 2011-2040 kaikkien 48 skenaarion mukaan pienempi kuin 1981-2010, mutta yli  $-35^{\circ}\text{C}$ :n pakkasille tämä pätee vasta vuosisadan lopulla – näin siitä huolimatta, että parhaan arvion mukaan kovimmat pakkaset vähenevät kaikkein eniten.

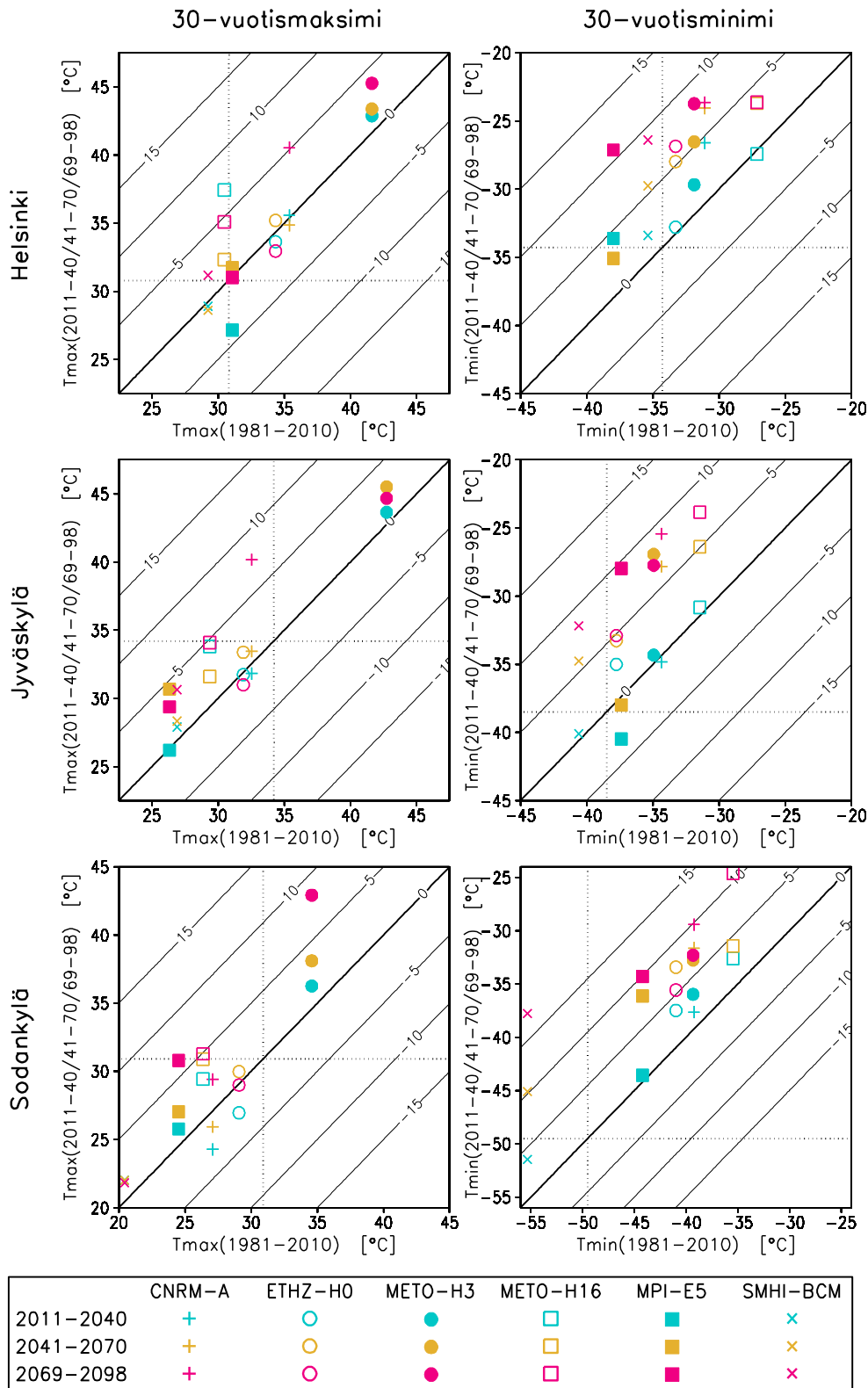
5. Tällä vuosisadalla tulee todennäköisesti (muttei aivan varmasti) esiintymään tähänastista korkeampia huippulämpötiloja. Esimerkiksi korkein Jyväskylän lentoasemalla vuosina 1981-2010 havaittu lämpötila oli  $+34.2^{\circ}\text{C}$  (29.7.2010), ja heinäkuussa 1914 kaupungissa mitattiin  $+35.0^{\circ}\text{C}$ . Taulukon 4 mukaan  $+35^{\circ}\text{C}$  ylittyisi siellä jo vuosina 2011-2040 50%:n todennäköisyydellä, ja vuosina 2069-2098 jo 85%:n todennäköisyydellä.
6. Ilmaston lämpenemisestä huolimatta myös tulevana vuosikymmeninä voi vielä esiintyä varsin kireitäkin pakkasia. Esimerkiksi Helsingissä  $-30^{\circ}\text{C}$  alittuu alkaneen 30-vuotisjakson 2011-2040 aikana noin kahden kolmasosan todennäköisyydellä, ja vielä vuosisadan lopullakin (2069-2098) laskelma antaa  $-25^{\circ}\text{C}$ :n alittumiselle yli 50 % todennäköisyyden. Sodankylässä  $-40^{\circ}\text{C}$  näyttäisi alittuvan jakson 2011-2040 aikana jokseenkin varmasti, ja jopa vuosina 2069-2098 sen alittuminen näyttää täysin mahdolliselta (laskettu todennäköisyys 42 %).

#### 4. Kuinka lämmintä tai kylmää säätä tällä vuosisadalla voi esiintyä?

Yhtäkään käytetyistä laskentamenetelmistä ei ole räätälöity lämpötilan absoluuttisten ääriarvojen käsittelyä silmällä pitäen, vaan ne kaikki pyrkivät antamaan mahdollisimman realistisen kuvan lämpötilojen todennäköisyysjakaumasta kokonaisuudessaan. Pohdittaessa, kuinka korkeita tai matalia ylimmät ja alimmat tulevaisuudessa havaittavat lämpötilat voisivat olla, on siksi syytä tutkia ensin mallituloksia sellaisenaan.

Kuvassa 6 on kooste mallien simuloimista eri 30-vuotisjaksojen absoluuttisista ääriämpötiloista. Kussakin osakuvassa on kutakin mallia kohti kolme allekkain sijaitsevaa symbolia. Näiden sijainti vaaka-akselilla kertoo simuloitujen alimman tai ylimmän lämpötilan vuosina 1981-2010. Sinisten, keltaisten ja punaisten symbolien pystysuuntainen sijainti antaa vastaavat lämpötila-arvot vuosina 2011-2040, 2041-2070 ja 2069-2098. Tulevien 30-vuotisjaksojen ja jakson 1981-2010 ääriämpötilojen eron voi lukea alavasemmalta yläoikealle suuntautuvien diagonaaliviivojen avulla. Kuvasta nähdään mm. seuraavat asiat:

1. Mallien vuosina 1981-2010 simuloimat ääriämpötilat eroavat joissain tapauksissa hyvinkin paljon havaituista. Yhdessä malleista (METO-H3) lämpötila esimerkiksi kohoaa jo tämän jakson aikana Helsingissä ylimmillään  $+42$  asteeseen ja Jyväskylässä  $+43$  asteeseen. Kaikissa muissa malleissa jakson 1981-2010 maksimilämpötilat ovat sen sijaan Jyväskylässä ja Sodankylässä havaittua alempia, kun taas simuloitujen alimmat lämpötilat ovat varsinkin näillä kahdella paikkakunnalla voittopuolisesti havaittua korkeampia.
2. Perusjakson 1981-2010 ääriämpötiloilla ei näytä olevan systemaattista yhteyttä siihen, kuinka suurina ääriämpötilojen muutoksia mallit alkavalle vuosisadalle ennustavat. Sodankylässä kylläkin ylin lämpötila nousee eniten jo valmiiksi korkeimpia lämpötiloja simuloivassa METO-H3-mallissa ja alin lämpötila eniten SMHI-BCM-simulaatiossa, joka on nykyilmaston osalta selvästi muita kylmempi. Mallienvälinen korrelaatio nykyilmaston ääriämpötilojen ja ääriämpötilojen muutoksen välillä ei kuitenkaan ole yhdessäkään tapauksessa tilastollisesti merkitsevä.



**Kuva 6.** Lämpötilan absoluuttiset maksimi- ja minimiarvot ENSEMBLES-simulaatioissa eri 30-vuotisjaksoilla Helsingissä, Jyväskylässä ja Sodankylässä. Kussakin kuvassa vaaka-akseli kertoo eri mallien simuloimat ääriämpötilat vuosina 1981-2010, pystyakseli vastaavat arvot vuosina 2011-2040 (siniset symbolit), 2041-2070 (keltaiset symbolit) ja 2069-2098 (punaiset symbolit). Diagonaaliviivat antavat eron tulevien 30-vuotisjaksojen ja jakson 1981-2010 välillä. Vertailun vuoksi kuviin on myös merkitty korkeimmat ja alimmat kullakin paikalla vuosina 1981-2010 havaitut lämpötilat vaaka- ja pystysuorilla pisteviivoilla.

3. Ääriarvojen muutokset jaksolta 1981-2010 myöhempisiin 30-vuotisjaksoihin vaihtelevat suuresti mallista toiseen. Keskimäärin alimmat lämpötilat nousevat kuitenkin malleissa enemmän kuin ylimmät.

Tarkempaa numeerista tietoa 30-vuotisten ääriämpötilojen muutoksista ENSEMBLES-malleissa on taulukossa 6. Keskimäärin ylimmät lämpötilat nousevat jaksoon 2069-2098 mennessä näissä malliajoissa vain noin 3°C, alimmat taas paikkakunnasta riippuen 8-10°C. Aiempia 30-vuotisjaksoja tarkasteltaessa muutokset ovat vielä selvästi pienempiä. Taulukko 6 ja kuva 6 paljastavat myös useita tapauksia, joissa jonkin mallin simuloima korkein maksimilämpötila tai alin minimilämpötila on vuosina 2011-2040, 2041-2070 tai (maksimilämpötilan osalta) jopa 2069-2098 alempi kuin 1981-2010. Todennäköisimmin tämä selittyy ääriämpötilojen suurella satunnaisvaihtelulla.

Esimerkiksi Jyväskylässä simuloitu korkein lämpötila on vuosina 2069-2098 alimmillaan 0.9°C alempi ja ylimmillään 7.6°C korkeampi kuin vuosina 1981-2010. Vertaamalla jälkimmäistä arvoa Jyväskylän havaittuun maksimiarvoon +34.2°C voidaan ounastella, että jopa 40°C:n ylitys olisi paikkakunnalla tällä vuosisadalla mahdollinen. Toisaalta mallitulosten vaihtelun valossa on myös mahdollista, ettei alkaneen vuosisadan loppuvuosikymmenille lainkaan osuisi tähänastista korkeampia huippulämpötiloja. Jos tarkasteltavaksi otetaan koko jakso 2011-2098, niin sen aikana jakson 1981-2010 ylin lämpötila kuitenkin ylittyy kaikissa kuudessa malliajossa kaikilla kolmella paikkakunnalla (vrt. kuva 6).

**Taulukko 6.** Havaitut lämpötilan absoluuttiset maksimi- ja minimiarvot vuosina 1981-2010 sekä ENSEMBLES-mallien simuloimat muutokset näissä maksimi- ja minimiarvoissa vuosien 1981-2010 ja myöhempien 30-vuotisjaksojen välillä. Kuuden mallin tulosten keskiarvo on merkitty lihavoimalla ja vaihteluväli sulkuihin. Punaisella varjostuksella on merkitty ne tapaukset, joissa tarkasteltava ääriämpötila nousee kaikissa kuudessa mallissa.

|                  |                                 | Helsinki                | Jyväskylä               | Sodankylä                |
|------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| T <sub>max</sub> | havainnot (1981-2010)           | <b>+30.8</b>            | <b>+34.2</b>            | <b>+30.9</b>             |
|                  | muutos (1981-2010) →(2011-2040) | <b>0.6</b> (-3.8 – 6.9) | <b>0.9</b> (-0.7 – 4.4) | <b>0.5</b> (-2.8 – 3.1)  |
|                  | muutos (1981-2010) →(2041-2070) | <b>0.7</b> (-0.6 – 1.9) | <b>2.2</b> (0.9 – 4.5)  | <b>2.0</b> (-1.2 – 4.5)  |
|                  | muutos (1981-2010) →(2069-2098) | <b>2.4</b> (-1.4 – 5.1) | <b>3.4</b> (-0.9 – 7.6) | <b>3.9</b> (-0.1 – 8.5)  |
| T <sub>min</sub> | havainnot (1981-2010)           | <b>-34.3</b>            | <b>-38.5</b>            | <b>-49.5</b>             |
|                  | muutos (1981-2010) →(2011-2040) | <b>2.3</b> (-0.3 – 4.5) | <b>0.2</b> (-2.9 – 2.8) | <b>2.7</b> (0.8 – 3.9)   |
|                  | muutos (1981-2010) →(2041-2070) | <b>5.0</b> (3.0 – 7.0)  | <b>4.9</b> (-0.5 – 8.1) | <b>7.4</b> (4.0 – 10.2)  |
|                  | muutos (1981-2010) →(2069-2098) | <b>7.6</b> (3.5 – 11.0) | <b>7.8</b> (4.9 – 9.5)  | <b>10.2</b> (5.4 – 17.6) |

Taulukon 5 epävarmuusvälejä tutkittaessa on syytä muistaa, että käytössä on ollut vain 6 mallisimulaatiota. Suurempaa mallijoukkoa käytettäessä mallien välinen vaihteluväli entisestään kasvaisi.

## 5. Yhteenveto

Sitä, kuinka korkeita tai matalia päivittäisiä lämpötiloja tulevaisuudessa esiintyy, ei voida päätellä suoraan tähänastisten perusteella. Huomioon joudutaan ottamaan myös kasvihuoneilmaston voimistumisen aiheuttama ilmastonmuutos, jonka vaikutusta voidaan arvioida ilmastomallitulosten pohjalta. Toisaalta ilmastomallitkaan eivät riitä tulevaa ilmastoa arvioitaessa yksinään, koska jo mallien simuloima tähänastinen ilmasto eroaa havaitusta ilmastosta. Parhaat arviot tulevasta lämpöoloista saadaan siis havainnot ja mallitulokset

yhdistämällä. Yhdistäminen voidaan tehdä joko erityyppisillä delta-menetelmillä, joissa havaittuja lämpötila-aikasarjoja muokataan mallien simuloimia ilmastonmuutoksia käyttäen, tai harhankorjausmenetelmillä, joissa mallin simuloimaa tulevaa ilmastoa korjataan havaitun ja simuloitun nykyilmaston vertailun perusteella.

Tässä raportissa on arvioitu korkeiden ja matalien päivittäislämpötilojen esiintymistä tällä vuosisadalla kolmella paikkakunnalla (Helsinki, Jyväskylä ja Sodankylä), käyttäen hyväksi kuuden ENSEMBLES-hankkeessa toteutetun, SRES A1B-päästöskenaarioon perustuvan alueellisen ilmastomalliajon tuloksia. Mallitulokset yhdistettiin vuosien 1981-2010 havaintoihin kaikkiaan kymmentä delta- ja harhankorjaus-menetelmää käyttäen. Tutkimuksen keskeiset johtopäätökset olivat seuraavat:

1. Käytetyistä yhdistämismenetelmistä kaksi (havaitun aikasarjan tai mallin ennustaman aikasarjan muokkaus niin, että vain keskiarvon muutos tai keskiarvon harha otetaan huomioon) todettiin liian yksinkertaisiksi, edellinen lähinnä talvilämpötiloja mutta jälkimmäinen myös kesälämpötiloja tarkasteltaessa. Muita kahdeksaa menetelmää ei sen sijaan voi tuomita oikopäätä huonoiksi eikä niitä voi asettaa yksikäsitteiseen paremmuusjärjestykseen (ks. myös Räisänen ja Rätty (2012)). Siksi tulevaa ilmastoa arvioitaessa on syytä ottaa huomioon myös havaintojen ja mallitulosten yhdistämismenetelmän valintaan liittyvä epävarmuus.
2. Kaikkiaan yhdistämismenetelmän valinta vaikuttaa tulevaa lämpötilailmastoa koskeviin ennusteisiin vähemmän kuin vaihtelu eri mallisimulaatioiden välillä. Menetelmän valinnan merkitys kasvaa kuitenkin lämpötilajakauman ääripäitä lähestyttäessä.
3. ENSEMBLES-simulaatioiden ennustama ilmaston lämpeneminen näkyy sekä korkeiden kesäaikaisten maksimilämpötilojen yleistymisenä että alhaisten talvisten minimilämpötilojen harvinaistumisena (taulukot 3-5). Lähivuosisikymmeninä (2011-2040) muutoksen suunta ei kuitenkaan ole vielä aivan yksikäsitteinen. Ennakoitu muutos on suhteessa suurin lämpötilajakauman ääripäissä. Toisaalta hyvin korkeiden ja hyvin matalien lämpötilojen tulevaa esiintymistiheyttä koskeviin arvioihin liittyy myös eri syistä huomattavasti enemmän epävarmuutta kuin kohtalaisen korkeiden ja matalien lämpötilojen esiintymiseen.
4. Kaikkein alimmat lämpötilat nousevat tämän vuosisadan aikana todennäköisesti enemmän kuin kaikkein korkeimmat lämpötilat (taulukko 6). Hyvin harvinaisten, esimerkiksi kerran 30 vuodessa esiintyvien ääriämpötilojen muutoksiin liittyy kuitenkin paljon epävarmuutta, osaksi jo yksin niiden suuren luonnollisen vaihtelun takia.

Tämän tutkimuksen tärkein rajoitus on käytettyjen mallisimulaatioiden vähäinen lukumäärä. Vaikka ENSEMBLES-mallien 25 km:n erotuskyky teoriassa antaakin paremmat eväät tarkastella lämpötilojen paikallista ja lyhytaikaista vaihtelua kuin mihin maailmanlaajuisilla ilmastomalleilla päästään, on kuuden mallisimulaation joukko tilastollisena otoksena pieni. Siksi tässä työssä esitettyjä epävarmuusarvioita voidaan parhaimmillaankin pitää vain suuntaa-antavina. Joka tapauksessa näistä arvioista puuttuu kasvihuonekaasupäästöjen kehitykseen liittyvä epävarmuus, joka on lähivuosisikymmeniä tarkasteltaessa pieni mutta kasvaa huomattavasti vuosisadan loppua kohti (esim. Meehl ym. 2007).

## Kirjallisuusviitteet

- Kämäräinen, M., 2013: Projections of future daily temperatures in Finland. Pro gradu -työ, Helsingin yliopiston fysiikan laitos, 53 + 9 s.
- Meehl G.A. ym., 2007: Global climate projections. Climate Change 2007: the Physical Science Basis, S Solomon ym. (toim.), Cambridge University Press, s. 747-845
- Nakićenović, N. ym., 2000: Emission Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 599 s.
- Räisänen, J. ja O. Räty, 2012: Projections of daily mean temperature variability in the future: cross-validation tests with ENSEMBLES regional climate simulations. Climate Dynamics, 10.1007/s00382-012-1515-9.
- van der Linden, P. ja J. F. B. Mitchell (toim.), 2009: ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK, 160 s.