



ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

RAPORTTEJA
RAPPORTER
REPORTS
2009:4

Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta
sopeutumistutkimuksia varten
ACCLIM-hankkeen raportti 2009

KIRSTI JYLHÄ
KIMMO RUOSTEENOJA
JOUNI RÄISÄNEN
ARI VENÄLÄINEN
HEIKKI TUOMENVIRTA
LEENA RUOKOLAINEN
SEPPO SAKU
TEIJA SEITOLA

**RAPORTTEJA
RAPPORTER
REPORTS
No. 2009:4**

**551.524.3, 551.577.3, 551.578.46,
551.583.16, 551.588.74, 551.582 (480)**

Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten

ACCLIM-hankkeen raportti 2009

**Kirsti Jylhä¹
Kimmo Ruosteenoja¹
Jouni Räisänen²
Ari Venäläinen¹
Heikki Tuomenvirta¹
Leena Ruokolainen²
Seppo Saku¹
Teija Seitola¹**

¹ Ilmatieteen laitos, ² Helsingin yliopisto

**Ilmatieteen laitos
Meteorologiska Institutet
Finnish Meteorological Institute**

Helsinki 2009

ISBN 978-951-697-699-3 (nid.)

ISBN 978-951-697-700-6 (pdf)

ISSN 0782-6079

Yliopistopaino

Helsinki 2009



ILMATIETEEN LAITOS

Julkaisija Ilmatieteen laitos, (Erik Palménin aukio 1)
PL 503, 00101 Helsinki

Julkaisun sarja, numero ja raporttikoodi
Raportteja 2009:4

Julkaisuaika 2009

Tekijät
Kirsti Jylhä, Kimmo Ruosteenoja, Jouni Räisänen,
Ari Venäläinen, Heikki Tuomenvirta,
Leena Ruokolainen, Seppo Saku, Teija Seitola

Projektin nimi
ACCLIM

Nimeke

Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten. ACCLIM-hankkeen raportti 2009

Tiivistelmä

Ilmaston vaihteluihin ja muutokseen varautuminen edellyttää mahdollisimman luotettavaa tietoa menneestä, nykyisestä ja tulevasta ilmastosta, sekä sen keskimääräisistä arvoista että vaihteluista ja ääri-ilmiöistä. ACCLIM-hankkeen tehtävänä on huolehtia Ilmastonmuutoksen sopeutumistutkimusohjelman (ISTO) nykyistä ja tulevaa ilmasto koskevasta tietopalvelusta. Tämä raportti esittää hankkeen ensimmäisen vaiheen (2006–2008) tuloksia.

Hankkeessa on päivitetty Suomea koskevat ilmastonmuutosskenaariot IPCC:n 4. arviointiraporttia varten tehtyjen ilmastomallikokeiden tulosten avulla. Samalla on tuotettu entistä kattavampaa tietoa ilmastonmuutoksiin liittyvistä epävarmuustekijöistä, soveltuvien osien muutosten suuruuden todennäköisyysjakaumien muodossa. Hankkeessa on myös laskettu toistuvuusajaksot luottamusväleinen joukolla keskeisiä ilmastomuuttujia säähavaintojen pohjalta ja tutkittu esimerkinomaisesti lämpötilojen toistuvuusajakojen muuttumista jo toteutuneen lämpenemisen myötä.

Keskilämpötilan ja sademäärän muutosennusteet vuodenajoin on laskettu erikseen neljälle lähivuosikymmenelle sekä kolmelle peräkkäiselle 30-vuotisjaksolle. Tulosten mukaan jo ensi vuosikymmen (2011–2020) on Suomessa keskimäärin lämpimämpi kuin vertailujakso 1971–2000 peräti yli 95%:n todennäköisyydellä. Tämän vuosisadan loppuun mennessä vuoden keskilämpötilan ennustetaan kohoavan 2–6 °C. Kasvihuoneilmaston voimistumisen vaikutus sademääriin erottuu ilmaston luonnollisen vaihtelun seasta paljon lämpötilan muutoksia hitaammin. Sekä lämpeneminen että sademäärien lisääntyminen on talvella kesää voimakkaampaa.

Hankkeessa on arvioitu lisäksi sitä, miten paljon muuttuvat mm. vuorokauden ylin ja alin lämpötila, pakkaspäivien ja sadepäivien määrä, rankkasateet, pitkät poutajakset, lumipeite, pilvisuus, auringonsäteily, termiset vuodenaajat ja terminen kasvukausi. Tärkeä osa hanketta on myös vuorovaikutus muiden tutkimustahojen kanssa. Erityisesti on kartoitettu ilmastotiedon käyttäjien tarpeita sekä tarjottu asiantuntijaopastusta ilmastotiedon käyttämisestä ilmastonmuutoksen vaikutus- ja sopeutumistutkimuksissa.

Julkaisijayksikkö

Ilmastonmuutos (ILM)

Luokitus (UDK)

551.524.3, 551.577.3, 551.578.46,
551.583.16, 551.588.74, 551.582 (480)

Asiasanat

Ilmasto, ilmastonmuutos, säähavainnot, ilmastomallit, ilmastoskenaariot, todennäköisyysennusteet, toistuvuusajaka, ääriarvoanalyysi, ilmastonmuutokseen sopeutuminen

ISSN ja avainnimeke

0782-6079 Raportteja - Rapporter - Reports

ISBN

978-951-697-699-3 (nid.)
978-951-697-700-6 (pdf)

Kieli

suomi (tiivistelmä, laajennettu tiivistelmä ja kuvatestit myös englanniksi)

Myynti

Ilmatieteen laitos
PL 503, 00101 Helsinki

Sivumäärä 102

Hinta

Lisätietoja



FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

Published by

Finnish Meteorological Institute
(Erik Palménin aukio 1) , P.O. Box 503
FIN-00101 Helsinki, Finland

Series title, number and report code of publication
Reports 2009:4

Date 2009

Authors

Kirsti Jylhä, Kimmo Ruosteenoja, Jouni Räisänen,
Ari Venäläinen, Heikki Tuomenvirta,
Leena Ruokolainen, Seppo Saku, Teija Seitola

Name of project

ACCLIM

Commissioned by

ISTO, Environmental cluster, EKOTULI

Title

The changing climate in Finland: estimates for adaptation studies. ACCLIM project report 2009

Abstract

A proper and timely adaptation to climate change and its impacts should be based on the best available knowledge of past, current and future climate. Climate information required by the Finland's Research Programme on Adaptation to Climate Change (ISTO) is provided by the ACCLIM project. This report documents the results obtained during the first phase of the project (2006–2008).

The main outcomes of the ACCLIM project include; (i) return periods of extreme weather events based on observations at twelve weather stations, (ii) climate scenarios and probabilistic estimates of changes in climate over Finland based on an analysis of global and regional climate model simulations, (iii) guidance in the use of climate information in climate change impacts and adaptation research.

The future projections of seasonal and annual mean temperature and precipitation are given separately for the next four decades and for three consecutive 30-year periods. The probability that in Finland the next full decade (2011–2020) will be warmer than the baseline period 1971–2000 appears to exceed 95%. By the end of this century, the annual mean temperature is projected to increase by 2–6°C. The effect of increasing greenhouse gas concentrations on precipitation is expected to be much weaker relative to natural variability than the effect on temperature. Both the warming and increases in precipitation will be stronger in winter than in summer.

The results of the project, summarized in an extended abstract, include projections for other climate variables as well, including daily minimum and maximum temperature, number of frost days and wet days, heavy precipitation, dry periods, snow cover, cloudiness, global radiation, thermal seasons and growing season length.

Publishing unit

Climate Change (ILM)

Classification (UDK)

551.524.3, 551.577.3, 551.578.46,
551.583.16, 551.588.74, 551.582 (480)

Keywords

Climate, climate change, observations,
modelling, scenarios, probability forecasts,
return periods, extreme value analysis,
adaptation

ISSN and series title

0782-6079 Raportteja - Rapporter - Reports

ISBN

978-951-697-699-3 (nid.)
978-951-697-700-6 (pdf)

Language

Finnish (Abstract, extended abstract and captions for
figures and tables also in English)

Sold by

Finnish Meteorological Institute
P.O.Box 503, FIN-00101 Helsinki
Finland

Pages 102

Price

Note

Esipuhe

Kasvihuoneilmion väistämättä voimistuessa myös Suomen ja sen lähialueiden ilmasto muuttuu. Ilmaston muutokset vaikuttavat monin eri tavoin ympäristöön, talouselämään ja ihmisten elinoloihin. Niinpä tulevaisuutta koskevan yhteiskunnallisen ja poliittisen päätöksenteon kannalta on hyvin oleellista, että käytettävissä on mahdollisimman luotettavaa tietoa menneestä, nykyisestä ja tulevasta ilmastosta.

Kansalliseen ilmastonmuutoksen sopeutumisstrategiaan sisältyvä Ilmastonmuutoksen sopeutumistutkimusohjelma (ISTO) sekä tähän liittyvä Ympäristöklusterin tutkimusohjelman ilmastonmuutoksen hillitsemistä ja sopeutumista koskeva osuus tuottavat uutta tietoa sovellettavaksi käytännön toimien suunnittelussa. Yhteistyössä näiden ohjelmien kanssa on toiminut myös Tiehallinnon “Ekotehokas ja turvallinen liikennejärjestelmä” (EKOTULI) –teema. Tutkimusohjelmien tarvitsemien ilmastotietojen laatimisesta ja niitä koskevasta asiantuntijapalvelusta on vuosina 2006–2008 vastannut hanke nimeltään “Sään ääri-ilmiöt nykyilmastossa ja uusimpiin mallikokeisiin perustuvat arviot ilmastonmuutoksesta sopeutumistutkimuksia varten” (ACCLIM¹), ja tehtävää jatkaa hanke “Ilmastonmuutosarviot ja asiantuntijapalvelu sopeutumistutkimuksia varten” (ACCLIM II).

Näistä kahdesta peräkkäisestä hankkeesta koostuvan tutkimustyön toteuttavat Ilmatieteen laitos ja Helsingin yliopiston Fysiikan laitoksen Ilmakehätieteiden ja geofysiikan osasto sekä jatkohankkeeseen osallistuva Suomen ympäristökeskus. Työn ensimmäisen vaiheen ohjausryhmässä olivat edustettuina maa- ja metsätalousministeriö, ympäristöministeriö, liikenne- ja viestintäministeriö, Tiehallinto sekä kaksi rinnakkaishanketta: “Ilmastonmuutoksen huomioiminen kaavoituksessa” ja “Extreflood II - Tulvatuhojen minimointi: Tulvaskenaariot, tuhojen arvottaminen ja riskikartoitus”.

Tämä raportti kertoo tutkimustyön ensimmäisen vaiheen eli ACCLIM-hankkeen tuloksista. Hankkeessa on syntynyt uutta tietoa tähänastisen ilmaston ääri-ilmiöistä ja todennäköisyyssennusteina annettuja arvioita ilmastonmuutoksen nopeudesta maassamme. Tuloksia voitaneen hyödyntää sopeutumistutkimusten ohella myös ilmastonmuutosten vaikutuksia tutkittaessa, lyhyen ja pitkän aikavälin riskienhallinnan suunnittelussa sekä ilmastopolitiikan taustatietona.

Lisätietoa hankkeen tuloksista on esitetty verkkosivustolla www.fmi.fi/acclim.

Helsingissä syyskuussa 2009

Kirsti Jylhä

Erikoistutkija

¹Hankkeen lyhenteen taustalla ovat englanninkieliset sanat “acclimate” ja “acclimatize”, jotka merkitsevät mukautumista uuteen ilmastoon, uusiin olosuhteisiin jne., joskin nopeammin kuin mitä sanalla “adapt” yleensä tarkoitetaan.

Sisältö

Laajennettu tiivistelmä	9
Extended abstract	13
1 Johdanto	17
2 Aineistot	19
2.1 Ilmastohavainnot	19
2.2 Maapallonlaajuiset ilmastomallit	19
2.3 Alueelliset ilmastomallit	20
3 Menetelmät	21
3.1 Sään ääriarvojen toistuvuuden arviointi	21
3.2 Ilmastoennusteiden epävarmuuslähteet	23
3.3 Muutosten todennäköisyysjakaumien laadinta	25
3.4 Klimatologisten keskilämpötilojen ja sademäärien arviointi	27
3.5 Sään vaihtelua kuvaavien indeksien muutosten arviointi	28
4 Tuloksia	29
4.1 Millaisia lämpötiloja ja sademääriä Suomessa on havaittu keskimäärin kerran 20 tai 50 vuodessa?	29
4.1.1 Kireät pakkaset ja helteet	29
4.1.2 Runsaat sateet	31
4.1.3 Vähäsateiset jaksot	33
4.2 Lämpötilan ja sademäärän tulevien muutosten maantieteellinen jakauma	34
4.3 Lämpeneekö jo lähivuosikymmeninä?	37
4.4 Ovatko jo ensi vuosikymmenet sateisempia kuin mihin on totuttu?	39
4.5 Kuinka tarkkaan pystytään arvioimaan vuosisadan jälkipuoliskon ilmasto?	41
4.6 Siirtyvätkö Turun talvet Jyväskylään vai Rovaniemelle?	44
4.7 Säilyvätkö neljä vuodenaikaa — miten kasvukausi muuttuu?	46
4.8 Miten vuorokauden ylin ja alin lämpötila muuttuvat?	48
4.9 Vieläkö tulevaisuudessa pakkaneen paukkuu?	49

4.10	Miten käy lumipeitteen?	51
4.11	Lisääntyvätkö sadepäivät vai pitenevätkö poutakaudet?	54
4.12	Nähdäänkö talvisin aurinkoa entistäkin harvemmin?	57
4.13	Maan kosteuden ja roudan muutoksista ristiriitaista mallitietoa	58
4.14	Lyödäänkö havaitut entiset lämpötila- ja sade-ennätykset?	58
4.15	Tulosten yhdistelmiä	63
5	Ilmastotiedon hyödyntämisestä sopeutumistutkimuksissa	65
5.1	Ilmastotiedon tarpeet ja käytön opastus	65
5.2	Keskimääräisilmaston muutokset	67
5.3	Ilmaston ja sään ääri-ilmiöt	69
6	Yhteenveto ja johtopäätökset	71
	Kiitokset	73
	Kirjallisuusviitteet	74
	Liitteet	79
	Liite 1: Tutkimuksessa käytetyt havaintoasemat	79
	Liite 2: Tutkimuksessa käytetyt maapallonlaajuiset ilmastomallit	80
	Liite 3: Tutkimuksessa käytetyt alueelliset ilmastomallit	81
	Liite 4: Ääriarvojen analysoinnista	82
	Liite 5: Kasvihuonekaasujen ja pienhiukkasten päästö- ja pitoisuusskenaariot	83
	Liite 6: Lämpötilan ja sademäärän lähivuosisikymmenien keskiarvoja koskevien todennäköisyssennusteiden laadinta	84
	Liite 7: Ilmaston vuosienvälistä vaihtelua kuvaavien todennäköisyysjakaumien arviointi	87
	Liite 8: Yhteismitallistettujen lämpötila- ja sademääräskenaarioiden laskeminen	89
	Liite 9: Lämpötilan ja sademäärän muutosten todennäköisyysjakaumat Etelä- ja Pohjois-Suomessa lähivuosisikymmeninä	91
	Liite 10: Lämpötilan ja sademäärän muutosten todennäköisyysjakaumat 30-vuotijaksoittain	92
	Liite 11: Rankkasateiden, sadepäivien ja pitkien poutajaksojen muutokset	94
A	Figure captions in English	96
B	Table captions in English	101

Laajennettu tiivistelmä

Tutkittaessa ilmastomuutoksen vaikutuksia ja keinoja siihen sopeutumiseksi tarvitaan mahdollisimman luotettavaa tietoa menneestä, nykyisestä ja tulevasta ilmastosta. Ilmastoa luonnehditaan keskiarvojen ja vaihteluvuuden sekä erilaisten ääritilanteiden esiintymistodennäköisyyksien avulla. Ilmaston tulevia muutoksia ei voida ennustaa tarkasti. Oma epävarmuutensa liittyy myös siihen, miten usein ja kuinka voimakkaita sään ääri-ilmiöitä voidaan odottaa esiintyvän Suomen nykyilmastossa. Tämän vuoksi on oleellista, että parhaiden arvioiden lisäksi tuloksille annetaan luotettavuutta kuvaavat epävarmuusvälit.

Lyhyen aikavälin ilmastoennusteissa tärkein epävarmuuslähde on ilmaston luonnollinen, vuosien ja vuosikymmenien välinen vaihtelu. Tämän luonnollisen vaihtelun takia ilmastomuutokset tulevat etenemään ajoittain nopeammin ja ajoittain hitaammin; voipa luonnollinen vaihtelu jopa lyhytaikaisesti kääntää ilmastomuutoksen suunnan päinvastaiseksikin kuin mitä kasvihuonekaasujen lisääntymisestä ilmakehässä sinällään seuraisi.

Mallitulosten perusteella näyttää siltä, että kasvihuoneilmaston voimistumisen aiheuttama ilmaston lämpeneminen on jo lähivuosisikymmeninä varsin selvää lämpötilojen luonnolliseen vuosikymmenten väliseen vaihteluun verrattuna. Todennäköisesti talvet lämpenevät jo lyhyellä tähtämellä enemmän kuin kesät, mutta koska talvilämpötilat vaihtelevat erityisen paljon luontaisestikin, myös ennusteen epävarmuus on suurin talvella. Vaikka toistaiseksi lämpeneminen on ollut melko pientä Suomen lämpöolojen suureen vuosienväliseen vaihteluun verrattuna, se on kuitenkin jo ilmeisesti moninkertaistanut huippukorkeiden kuukausi- ja vuodenaikaiskeskilämpötilojen esiintymistodennäköisyyden. Sen sijaan ilmaston lämpenemiseen liittyvä sademäärän kasvu erottuu ilmaston luonnollisen vaihtelun seasta paljon lämpötilan nousua heikommin.

Pitkällä tähtämellä ilmastoennusteiden suurimpia virhelähteitä ovat ilmastomalleihin ja kasvihuonekaasujen päästöjen kehitykseen liittyvät epävarmuudet. Tämän vuosisadan loppuun ulottuvat lämpötilan ja sademäärän muutosennusteet perustuvat 19 maailmanlaajuisella ilmastomuutosmallilla tehtyihin ajoihin. Ajoja tehtiin kolmella kasvihuonekaasuskenaariolla: A2 – suuret päästöt, A1B – melko suuret päästöt ja B1 – pienet päästöt. Ennusteita laadittaessa oletettiin kukin kolmesta kasvihuonekaasuskenaariosta yhtä todennäköisiksi. Näin saatiin muodostettua ilmastosuureiden muutoksille todennäköisyysjakauma, joka ottaa huomioon paitsi käytettävissä olevien mallien tulosten erilaisuuden myös kasvihuonekaasujen tuleviin päästöihin liittyvää epävarmuutta.

Ilmastomallit ennustavat Pohjois-Atlantia lämmittävien merivirtojen heikkenevän, mutta tästä huolimatta Suomessa ilmasto lämpenee selvästi – talvella enemmän kuin kesällä. Lämpeneminen, samoin kuin sademäärien lisääntyminen, etenevät koko vuosisadan ajan. Toki ilmaston luonnollinen vaihtelu tulee aika-ajoin kiihdyttämään, välillä taas jarruttamaan muutosta, mutta näitä heilahteluja on mahdotonta ennustaa. Mikäli kasvihuonekaasujen päästöjä onnistutaan rajoittamaan tehokkaasti (B1-skenaario), muutos alkaisi kuitenkin hidastua vuosisadan puolivälin aikoihin. Tällöin lämpötilan nousu jäisi vuosisadan lopulla vajaaseen kahteen kolmasosaan pahimmasta tarkastellusta vaihtoehdosta (A2-skenaario).

Maapallonlaajuisten ilmastomallikokeiden tuottamaa aineistoa on hankkeessa täydennetty alueellisilla ilmastomalleilla tehtyjen tarkentavien laskelmien tuloksilla. Keskilämpötilan ja kes-

kimääräisen sademäärän lisäksi tutkittiin koko joukkoa muita ilmastosuureita, esimerkiksi ylimpiä ja alimpia lämpötiloja, rankkasateita, pakkas- ja poutajaksoja, lumipeitettä, pilvisyyttä ja auringonsäteilyn määrää sekä termisiä vuodenaikoja ja kasvukauden pituutta.

Pyrittäessä sopeutumaan ilmaston vaihteluihin ja muutoksiin on erityisen tärkeää varautua sään ääri-ilmiöihin. Voidaksemme arvioida, kuinka sään ääri-ilmiöt tulevat muuttumaan tulevina vuosikymmeninä, meidän tulee tietää tilanne nykyilmastossa. Tässä hankkeessa on laskettu toistuvuustasot luottamusväleinen joukolle keskeisiä ilmastomuuttujia 12 eri puolilla Suomea sijaitsevan säähavaintoaseman mittaustietojen perusteella. *Venäläinen et al. (2007a)* ovat julkaisseet tutkimuksen tuloksena syntyneet lukuisat taulukot, ja tähän raporttiin on valittu muutamia esimerkkejä näistä tuloksista.

Sähköiseen muotoon saatetut päivittäiset havaintoaikasarjat ovat toistaiseksi pääosin runsaan 50 vuoden pituisia. Ne ovat varsin lyhyitä etenkin hyvin harvinaisten, mutta seurauksiltaan ehkä vakavienkin sään ääri-ilmiöiden analyysin kannalta. Toistuvuusaikatasojen luottamusväli saattavat käydä niin leveiksi, että se rajoittaa tulosten käyttöarvoa. On ilmeistä, ettei millään tilastollisella menetelmällä voida luotettavasti arvioida sellaisen ilmiön esiintymistodennäköisyyttä, josta toistaiseksi ei ole havaintoa tai joka on esiintynyt vain kerran tai kaksi havaintojakson aikana. Myös ilmaston muuttuminen on syytä ottaa huomioon, sillä sen myötä muuttuvat etenkin hyvin korkeiden ja matalien lämpötilojen toistuvuustasot.

Sään ääri-ilmiöt tähänastisessa ilmastossa

- Pohjois-Suomessa kireät pakkaset (minimilämpötila alle -20°C) kestävät keskimäärin kerran 20 vuodessa yhtäjaksoisesti runsaasta kahdesta lähes kolmeen viikkoon. Etelää kohden tällaiset kovan pakkasen jaksot lyhentyvät selvästi ja kestävät etelärannikolla harvoin yli viikon. Poikkeuksellisen kovat pakkaslukemat, joita esiintyy keskimäärin vain kerran 50 vuodessa, ovat Lapissa jopa noin 17 astetta kylmempiä kuin Etelä-Suomessa.
- Kesän korkeimpien lämpötilojen alueellinen jakauma on Suomessa varsin tasainen. Keskimäärin 20 vuoden välein toistuva helleluku on tyypillisesti $31\text{--}32^{\circ}\text{C}$. Yhtä usein koetaan pohjoisessakin vähintään noin viikon hellejakso.
- Helsingin pitkä havaintoaikasarja osoittaa, että vuoden alimpien minimilämpötilojen todennäköisyysjakauma on siirtynyt ajan myötä kipakammista kohti lauhempia pakkasia. Kylmempää kuin -28°C on Helsingissä viime vuosien havaintojen nojalla keskimäärin kerran vajaan 20 vuodessa, kun puoli vuosisata aiemmin vastaava toistuvuusaika oli noin 10 vuotta.
- Harvinaisen runsaiden sademäärien toistuvuusajat ovat Pohjois-Suomessa pidempiä kuin Etelä- ja Keski-Suomessa. Sitä vastoin pitkien vähäsateisten jaksoiden esiintymisessä ei löydy selvää eroa etelän ja pohjoisen välillä.

Mallikokeisiin perustuvat arviot ilmastonmuutoksesta

Hankkeessa on laadittu ilmastonmuutosennusteita erikseen neljälle lähivuosisikymmenelle sekä kolmelle peräkkäiselle 30-vuotisjaksolle vertailukauden ollessa 1971–2000. Jaksoja 2011–2020 ja 2070–2099 koskevat päätulokset ovat seuraavat:

- On hyvin todennäköistä, vaikkei aivan varmaa (yli 95%:n todennäköisyys), että jo ensi vuosikymmenen on Suomessa keskimäärin lämpimämpi kuin vertailukausi 1971–2000. Paras arvio koko vuoden keskilämpötilan nousulle tällä aikavälillä on noin 1°C.
- Sademäärä muuttuu Suomessa on melko hitaasti. Vielä lähivuosisikymmeninä kasvihuoneilmiön voimistumiseen liittyvä muutos voi hyvin hukkua ilmaston luonnollisen vaihtelun sekaan. Niinpä näyttäisi olevan noin yhden neljänneksen mahdollisuus, että tuleva vuosikymmen on vielä Suomessa keskimäärin vähäsateisempi kuin jakso 1971–2000.
- Vuoden keskilämpötilan ennustetaan olevan tämän vuosisadan loppuvuosikymmeninä 2–6°C korkeampi kuin vertailujaksona 1971–2000. Talvella lämpötila nousee 3–9, kesällä 1–5 astetta. Talvisin lämpeneminen on nopeampaa maamme pohjoisosissa kuin etelässä, kun taas kesäisin maan eri osien välillä ei ole suurta eroa. Mikäli lämpeneminen osuu esitetyn epävarmuushaarukan keskivaiheille, vuosisadan lopulla Keski-Lapin lämpöolot vastaisivat suurin piirtein nykyistä Etelä-Suomea.
- Ilmaston lämmitessä myös sademäärät lisääntyvät, vuosisadan lopulle tultaessa talvella 10–40% ja kesällä 0–20% jaksoon 1971–2000 verrattuna. Muutos on suurempi pohjoisessa kuin etelässä. Kesäisin sademäärien ennustettu pieni lisääntyminen ei välttämättä kuitenkaan lisää vesivaroja, koska lämpimässä ilmastossa myös veden haihtuminen lisääntyy.
- Terminen talvi (vuorokauden keskilämpötila pakkasen puolella) näyttäisi vuosisadan loppuun mennessä katoavan eteläisiltä ja lounaisilta rannikkoalueilta kokonaan, ja Lapissa se lyhenee malliarvioiden mukaan noin puolelta kuukaudella. Terminen kesä (keskilämpötila yli 10°C) ja terminen kasvukausi (keskilämpötila yli 5°C) vastaavasti pitenevät kumpainenkin 1–1,5 kuukaudella. Lounaassa kasvukausi pitenee muuta maata enemmän, ja siellä myös terminen syksy venähtää huomattavasti. Lapissa kasvukauden tehollinen lämpösumma vastaa vuosisadan lopulla nykyistä Etelä-Suomea, Etelä-Suomessa Keski-Euroopan pohjoisosia.
- Lämpötilasuureiden jakaumat siirtyvät tulevaisuudessa kokonaisuudessaan kohti korkeampia lämpötiloja. Eniten muuttuvat talvikuukausien alimmat minimilämpötilat. Melkein kaikki mallit ennustavat talvilämpötilojen vaihtelevuuden vähenevän ilmaston lämmitessä.
- Vuosisadan viimeiseen kolmannekseen siirryttäessä pakkaspäiviä on malliarvioiden mukaan Pohjois-Suomessa noin kolmannes ja etelässä noin puolet nykyistä vähemmän. Aikaväli syksyn ensimmäisestä kevään viimeiseen pakkaspäivään lyhenee lähes kahdella kuukaudella. Samalla tämän pakkaskauden lomaan osuvat suojapäivät lisääntyvät.

- Talvikuukausien nollapistepäivät (vuorokauden aikana sekä pakkasta että suojaa) lisääntyvät aluksi koko maassa, pohjoisessa ja idässä myöhemminkin. Lämpötilan kohoaminen ja nollapistepäivien väheneminen syksyllä ja keväällä johtaa kuitenkin siihen, että nollapistepäivien vuotuinen lukumäärä on vuosisadan loppupuolelle saavuttaessa nykyistä suurempi enää vain paikoin pohjoisessa.
- Lumen vesiarvo eli lumikuorma vähenee Etelä- ja Keski-Suomessa vuosisadan viimeiseen kolmannekseen mennessä 70–80%, jopa enemmän. Pohjois-Suomessakin Käsivarren Lappia lukuunottamatta lumen määrä jää alle puoleen nykyisestä. Myös lumen vesiarvon vuotuinen maksimi pienenee, samoin lumipeitteisten päivien määrä. Keskitalvella muutokset ovat pienempiä kuin syystalven ja kevään aikana.
- Talvella sadepäivät yleistyvät ja sateet runsastuvat. Samalla talvien pisimmät sateettomat jaksot lyhenevät. Rankkasateet voimistuvat myös kesällä. Sen sijaan kesän sadepäivien määrän ja pisimmän poutajakson muutoksista malliaineistot antavat toisistaan poikkeavia arvioita varsinkin Pohjois-Suomessa. Etelä-Suomen kesässä sadepäivät saattaisivat kuitenkin harveta.
- Mallilaskelmien mukaan talvet muuttuvat tulevaisuudessa entistäkin pilvisemmiksi ja auringottomammiksi. Kesällä ei pilvisyydessä ja auringonsäteilyn määrässä ole odotettavissa suuria muutoksia.
- Jo tähänastinen lämpeneminen näyttäisi moninkertaistaneen äärimmäisen leutojen talvikuukausien tai kokonaisten talvien esiintymistodennäköisyyden. Esimerkiksi ennätyslauhan talven 2007–2008 (tai vielä tätä leudomman talven) keskilämpötilan nykyiseksi toistuvuusajaksi saadaan Helsingissä ilmastonmuutos huomioon ottaen noin 35 vuotta, mutta peräti noin 200 vuotta, jos lämpenemistä ei oteta huomioon. Ilmastonmuutoksen vähitellen edetessä ennätyslämpimiä kuukausia ja vuodenaikoja tulee esiintymään yhä tiheämmin. Samalla kylmyysennätysten lyöminen on käymässä yhä epätodennäköisemmäksi.
- Ilmastonmuutoksen myötä kasvaa vähitellen todennäköisyys, että sade-ennätykset rikoontuvat aiempaa lyhyemmin väliajoin. Harvoin toistuvia äärisateita tarkasteltaessa ääriarvojen määrittämiseen liittyvä tilastollinen epävarmuus lienee kuitenkin nykyisellään ja lähitulevaisuudessa suurempi virhelähde kuin ilmaston muutosten huomioimatta jättäminen.

Hankkeen tärkeänä osana on myös vuorovaikutus muiden sopeutumistutkimusta tekevien tahojen kanssa. Vuorovaikutuksen tavoitteena on, että toimitettavat ilmastoaineistot vastaavat mahdollisimman hyvin niitä käyttävien tarpeita ja että käyttäjät saavat opastusta ilmastotiedon soveltamisesta omissa sopeutumistutkimuksissaan. Hankkeessa on myös pyritty koordinoimaan sitä, että tutkimusohjelman eri hankkeissa käytettävät räätälöidyt ilmastonmuutoskkenaariot vastaavat toisiaan ja että tulosten vertailu on näin mahdollista. Erityisesti on tuotu esiin ilmastomallien tuloksiin vielä liittyvät useat epävarmuustekijät, jotka tulee ottaa huomioon sopeutumistoimia koskevia päätöksiä tehtäessä. Niinpä niiden tutkijoiden, jotka ovat käyttämässä ACCLIM-hankkeen tuottamia ilmastotietoja, olisi hyvä perehtyä tähän raporttiin ja hankkeen [www-sivuilla \(www.fmi.fi/acclim\)](http://www.fmi.fi/acclim) julkaistavaan materiaaliin.

Extended abstract

Estimates of the magnitude of climate change, its impacts and options for adaptation should be based on the best available knowledge of past, current and future climate, including information about average values, variations and extreme events. Future climate change cannot be predicted exactly. There are also inaccuracies in the estimates of the recurrence of extreme weather and climate events based on observations. Consequently, it is essential to give not only the best estimates of the magnitude of climate changes but also uncertainty ranges of the changes. When planning adaptation options, these ranges may be taken into account.

The greatest uncertainty in short-term climate forecasts arises from the natural interannual and interdecadal variations of climate. Because of this natural variability, climate change is unlikely to proceed at a uniform rate. Temporarily, natural variability may even reverse the direction of the changes from the trend that is expected to result from increases in greenhouse gas (GHG) concentrations.

Climate models suggest, however, that the greenhouse-gas-induced warming will emerge relatively clearly from the background of natural interdecadal temperature variability during the next few decades. Although the near-term temperature increase is likely to be somewhat larger in winter than in summer, the large natural variability of winter temperatures also makes the uncertainty range of the forecast wider in winter. The warming experienced so far has been relatively small compared to the large interannual temperature variability in Finland, but even so, it has apparently been sufficient to cause a marked increase in the probability of extremely high monthly and seasonal mean temperatures. By contrast, during the next few decades the influence of the enhanced GHG effect on precipitation in Finland is expected to be much weaker in comparison with natural variability than the influence on temperature.

In the long run, the main uncertainties in climate projections are related to the deficiencies in climate models and GHG scenarios. The projections of changes in temperature and precipitation are based on experiments performed with 19 global climate models. The simulations were conducted by applying three different scenarios for GHGs; A2 – large emissions, A1B – rather large emissions, and B1 – small emissions. These emission scenarios were regarded equally likely, and simulations performed with these scenarios were combined to derive probability distributions of changes in climate variables; thereby uncertainties due to differences in climate models, and in GHG scenarios, could be taken into account simultaneously.

Based on current model simulations, the meridional overturning circulation in the Atlantic Ocean will slow down. In spite of that, the climate in Finland will become significantly warmer, more so in winter than in summer. The projected long-term time-averaged warming trend, as is the trend for increases in precipitation, appears to be, approximately, constant. These long-term trends will be superimposed on natural climate variability, which will accelerate changes in climate during some periods and retard changes during other periods, but these natural fluctuations cannot be predicted. Assuming efficient mitigation (B1 scenario), climate change would start to decelerate around the 2050s, and the warming by the end of the century would be about one third smaller compared to the worst case considered here (A2 scenario).

Information derived from the output of global climate models was complemented using simulations performed with regional climate models. Besides mean temperature and precipitation,

other climate variables were studied as well, including daily minimum and maximum temperature, frost days, heavy precipitation, dry periods, snow cover, cloudiness, global radiation, thermal seasons and growing season length.

An important aspect in adaptation to climate change is the adaptation to the climate extremes. In order to be able to estimate the future extremes we have to know the present climatic conditions. In this project, return periods of extreme weather events have been systematically examined based on observations at twelve weather stations in Finland. The results are given by Venäläinen et al. (2007a), and the current report shows some examples of them.

The observed daily time series dataset used in this study only covers about five decades, and based on this alone it is, therefore, difficult to estimate the return periods for very extreme phenomena that are inherently rare, occur randomly, but may have severe consequences. Confidence intervals for the return periods may be so wide that it is difficult to utilize the results in practice. Further challenges are caused by climate change, since, with global warming continuing, return periods for unusually high and low temperatures, in particular, will be altered.

Extreme events in the climate until now

- In northern Finland, continuous intervals of very cold weather (daily minimum temperature below -20°C) last for two to almost three weeks, once in every 20 years on average. Moving southwards, these intervals of cold weather shorten and, along the southern coast of the country, they seldom last longer than a week. Exceptionally low temperatures in February, occurring once in every 50 years, differ by as much as 17°C between Lapland and southern Finland.
- In summer the return levels of daily maximum temperature are distributed rather uniformly across Finland. A temperature of $31\text{--}32^{\circ}\text{C}$ is likely to be reached once in every 20 years on average. Throughout the country continuous periods of hot weather (daily maximum temperature above 25°C) typically last for at least one week once in every 20 years.
- The long historical data series in Helsinki indicates that the probability distribution of the lowest temperature in winter has shifted towards milder values. The return period for a temperature colder than -28°C in Helsinki is now about 20 years, whereas half a century ago it was about ten years.
- The return periods for heavy precipitation amounts are typically slightly longer in northern Finland than in central and southern parts of the country. By contrast, no clear south-to-north gradient can be found in the recurrence of prolonged periods with scant precipitation.

Projected future changes in climate in Finland

Climate change scenarios for Finland have been constructed separately for the next four decades and for three consecutive 30-year periods. The main results for the periods 2011–2020 ja 2070–2099 are summarized in the following.

- It is very likely (with a probability higher than 95%) that the mean temperature of the next full decade (2011–2020) will be higher than the mean of the currently-used baseline period (1971–2000). The current best estimate for the annual mean warming at this time horizon is about 1°C.
- Changes in precipitation are expected to take place rather slowly. During the next few decades, changes in precipitation will still be affected more strongly by natural variability than by increasing greenhouse gas concentrations. As a result, there is still a probability of about 25% that the mean annual precipitation in the decade 2011–2020 will be lower than that in 1971–2000.
- During the last decades of this century, the annual mean temperature is projected to be 2–6°C higher than the reference value during the period 1971–2000. Winters will get warmer by 3–9°C and summers by 1–5°C. Wintertime changes in the north exceed those in the south, whereas summertime changes are rather uniform across the country. Assuming that the actual warming will fall close to the median of the projections, by the end of the century the temperatures in central Lapland would approximately match those in present-day southern Finland.
- Accompanied with increases in temperature, precipitation amounts will also increase in Finland; in winter by 10–40%, and in summer by 0–20%, by the end of this century. In relative terms, the changes in the north will exceed those in the south. In spite of slight increases in summertime rainfall, water resources may not increase, since evaporation will also intensify in a warmer climate.
- Based on model simulations, thermal winter (daily mean temperature below zero) seems to disappear completely near southern and southwestern coastlines by the end of this century. In Lapland it would shorten by one and a half months. Both thermal summer (mean temperature above 10°C) and the thermal growing season (mean temperature above 5°C) would lengthen by 1–1.5 months. The increase in the length of the growing season is largest in the south-western part of the country, where the thermal autumn will also be considerably longer than now. By the end of the century the thermal growing season would be about the same in Lapland as it currently is in southern Finland. In southern Finland conditions presently occurring in northern parts of Central Europe would prevail.
- The frequency distributions of the mean, maximum and minimum temperatures will shift towards warmer values, with the largest change seen in the coldest values of daily minimum temperature in winter. Almost all models project a decrease in the variability of winter temperatures.
- The annual mean number of frost days during the last three decades of this century is projected to be one third smaller than currently in northern Finland and about half of the present number in the south. The frost-season (defined as the number of days between the first frost in autumn and the last frost in spring) will shorten by almost two months. Concurrently, thaw days will become more frequent during the frost-season.

- Wintertime freezing point days, with daily minimum temperature below zero, and maximum temperature above zero, first become more frequent on the whole country. Towards the end of this century, they continue to increase in the north and east, but start to decrease in the southwest. The mean annual number of freezing point days will then be larger than currently only locally in the north.
- For the period 2071–2100, the average snow depth (in terms of snow water equivalent) will decrease in southern and central Finland by 70–80% or even more. In northern Finland, with the exception of north-westernmost Lapland, the reduction will exceed 50%. The average annual maximum snow water content, as well as the number of snow cover days, will decline accordingly. The changes in mid-winter are projected to be smaller than those in early winter and spring.
- In winter, the frequency of wet days (with daily precipitation of 1 mm or more) and the maximum 1-day precipitation amount are both projected to increase, while the maximum number of consecutive dry days will decrease. Heavy precipitation events will also intensify in summer. However, the models disagree about the sign of summertime changes in the frequency of wet days and the maximum length of dry periods, particularly so in northern Finland. In southern Finland, the frequency of summertime wet days may decrease.
- Based on model estimates, wintertime weather will have more cloud cover, with less solar radiation. In summer, no major changes in cloudiness and radiation are expected.
- The warming observed so far already appears to be sufficient to cause a several-fold increase in the probability of extremely high monthly-to-seasonal mean temperatures in winter. For example, the return period for the record-high winter mean temperature observed in Helsinki during winter 2007–2008 is now estimated to be about 35 years. By contrast, without considering the observed climate change, the return period would have been about two centuries. In the future, with global warming continuing, record warm months and seasons are expected to become increasingly more common. An opposite trend is very likely for record cold events.
- Climate change gradually increases the likelihood of record-breaking amounts of precipitation. However, when considering return periods of exceptionally heavy precipitation events in the present and near-future climate, the statistical uncertainty arising from a small number of cases may still form a greater source of uncertainty than the effects of climate change.

An important part of the project consists of interaction with other research groups studying adaptation to climate change. The aim is to ensure that; (i) the project addresses the needs of the other research groups, (ii) these groups receive guidance in the use of climate information for their own studies, and (iii) climate scenarios are compatible between all ISTO-projects. Several sources of uncertainty that need to be taken into account in decision-making are particularly highlighted. Accordingly, researchers planning to utilize climate information produced in the ACCLIM project are encouraged to read this report and other information available on the project web pages (www.fmi.fi/acclim).

1 Johdanto

Ilmatieteen laitoksen ja Suomen Tiedeseuran vuonna 1846 aloittamien järjestelmällisten säähavaintojen perusteella Suomen keskilämpötilan vaihtelut tunnetaan melko tarkasti noin 150 vuoden ajalta². Vuosikeskilämpötila on kohonnut tänä aikana reilun asteen. Eniten, noin kaksi astetta, ovat lämmenneet kevät (maalis–toukokuu). Talvet ovat lämmenneet noin asteen sekä kesät ja syksyt puolisen astetta. Havainnoissa ilmenee myös suuria vaihteluita. Esimerkiksi viime vuosikymmeniin ovat osuneet vuosien 1985 ja 1987 kylmät talvet sekä lämpimät vuodet 1989, 2000 ja 2005–2008 (*Heino, 1994; Tuomenvirta, 2004; Tietäväinen et al., 2009*).

Havainnot siis kertovat, että ilmasto on alkanut lämmetä Suomessakin. Näin pienellä ja ilmaston luonnolliselle vaihtelulle alttiilla alueella on kuitenkin vaikea arvioida pelkäämään havaintojen perusteella, missä määrin jo havaittu lämpeneminen on kasvihuoneilmaston voimistumisen aiheuttamaa, missä määrin ihmiskunnan toimista riippumatonta. Havainnot ja havaittujen trendien jatkaminen eteenpäin eivät olekaan käypä lähtökohta, kun arvioidaan tulevaisuuden ilmastoa. Ilmastomuutoskenaarioiden laadinnan perustana ovat sen sijaan sosioekonomiset tulevaisuuden kehityskulut kasvihuonekaasujen päästöskenaarioineen sekä kasvihuonekaasujen lisääntymisen vaikutuksia ilmastoon simuloivat maapallonlaajuiset ilmastomallit. Näiden tuloksia on vielä mahdollista tarkentaa rajoitetun alueen ilmastomallikokeiden avulla.

Kasvihuoneilmaston voimistumisen aiheuttamasta ilmastomuutoksesta on Suomessa kirjoitettu jo 1970-luvulla (mm. *Holopainen, 1973; Rinne, 1976; Huovila ja Heino, 1979*). Skenaarioita Suomen ilmaston muuttumisesta on laadittu mm. SILMU-tutkimusohjelmassa (*Carter et al., 1996; Fortelius et al., 1996*), FIGARE-ohjelmaan kuuluneessa FINSKEN-hankkeessa (*Jylhä et al., 2004*) ja FINADAPT-hankkeessa (*Carter, 2007; Carter et al., 2005; Ruosteenoja et al., 2005*). ISTO-tutkimusohjelman ACCLIM-hankkeessa nämä skenaariot on päivitetty Hallitustenvälisen ilmastopaneelin neljäntä arviointiraporttia (*IPCC, 2007*) varten tehtyjen maapallonlaajuisen ilmastomallikokeiden tulosten mukaisiksi. Täydentävänä malliaineistona on lisäksi käytetty eurooppalaisessa PRUDENCE-hankkeessa (*Christensen et al., 2007*) ja ruotsalaisessa Rossby-keskuksessa tuotettuja alueellisia malliajoja.

Ilmastoa kuvataan useimmiten lämpötilan ja sademäärän keskimääräisten arvojen ja niiden vuodenaikojen välisen vaihtelun avulla. Kun tehdään ennusteita keskilämpötilan ja sademäärän muuttumisesta tulevaisuudessa, tuloksissa on väistämättä epävarmuutta. Kasvihuonekaasujen ja pienhiukkasten tulevia päästöjä ja pitoisuuksia ei tiedetä tarkasti, ja eri ilmastomallit antavat erilaisia arvioita siitä, kuinka herkästi ilmasto reagoi ilmaston koostumuksen muutoksiin. Lisäksi ilmasto vaihtelee myös luonnostaan vuodesta ja vuosikymmenestä toiseen, eikä näitä luonnollisia vaihteluita voida juurikaan ennustaa. Nämä epävarmuustekijät tulisi ottaa huomioon ilmastomuutoksia arvioidessa, erityisesti kun tutkitaan ilmastomuutosten käytännön vaikutuksia ja niihin sopeutumista. Hyvä tapa epävarmuuden kuvaamiseen on ennusteiden esittäminen todennäköisyysjakaumina.

Tässä tutkimuksessa olemme käyttäneet kahta erilaista menetelmää ilmastomuutosten todennäköisyysennusteiden laadintaan. Molempien menetelmien tavoitteena on tuottaa sopeutumisen kannalta käytännöllisiä tapoja käsitellä epävarmuuksia. Lähivuosikymmeninä muutosten

²Epäyhtenäisiä havaintosarjoja on olemassa myös varhaisemmilta ajoilta, esimerkiksi 1700-luvulta Turusta (*Holopainen, 2004; Holopainen et al., 2009*).

epävarmuus aiheutuu ennen kaikkea ilmaston luontaisesta vaihtelusta, joten alkuvaiheessa todennäköisyystarkastelu keskittyy tämän kuvaamiseen. Myöhemmin päästöihin ja mallitukseen liittyvä epävarmuus nousee hallitsevaksi, mikä on otettava huomioon todennäköisyysennusteita tehtäessä. Kun etsitään keinoja muuttuvaan ilmastoon sopeutumiseksi, ei voida lähteä ajatuksesta, että suunnitelmat toteutettaisiin erikseen eri kasvihuonekaasuskenaarioita varten. Pikemminkin tarvitaan ilmastonmuutoksen suuruutta varten yksi yhtenäinen todennäköisyysennuste, jota laadittaessa otetaan huomioon sekä kasvihuonekaasujen tulevien pitoisuuksien epävarmuus että eri ilmastomallien tulosten poikkeaminen toisistaan. Osa raportin tuloksista perustuu hankkeessa kehitettyyn menetelmään, jonka avulla tällaisia eri päästöskenaariot yhdistäviä todennäköisyysennusteita voidaan laatia. Toisaalta esitämme myös tuloksia erikseen eri päästöskenaarioille sen hahmottamiseksi, miten päästöjen hillintätoimet vaikuttavat ilmastonmuutoksen nopeuteen ja voimakkuuteen – ja siten myös sopeutumistoimien kiireellisyyteen.

Keskimääräisarvojen lisäksi ilmastoon kuuluvat olennaisena osana myös vaihtelut päivästä, kuukaudesta ja vuodesta toiseen. Koska sään ja ilmaston aiheuttamat riskit liittyvät usein ääritilanteisiin, tärkeä osa ilmastonmuutokseen sopeutumisesta on varautuminen sään ääri-ilmiöihin ja niissä ilmastonmuutoksen myötä mahdollisesti tapahtuviin muutoksiin. *Venäläinen et al. (2007a)* ovat laatineet laajan selvityksen keskeisten ilmastosuureiden ääriarvojen esiintymistodennäköisyyksistä pohjautuen menneiden vuosikymmenien aikana tehtyihin havaintoihin. Valikoima näistä tuloksista esitetään tässä raportissa. Lisäksi tarkastellaan sitä, miten ilmaston lämpeneminen on jo tähän mennessä vaikuttanut ääriämpötilojen esiintymistodennäköisyyksiin. Nämä tulokset ovat hyvin mielenkiintoisia esimerkiksi viime vuosina sattuneiden erittäin lauhjojen talvikuukausien tulkinnan kannalta.

Tämä raportti esittää kokoelman ACCLIM-hankkeen tuloksia. Aineistot ja menetelmät on kuvattu varsin yleisluonteisesti, mutta tarkempaa tietoa niistä on tarjolla raportin liitteissä. Havaintoihin perustuvien esiintymistodennäköisyyksien osalta tarkasteltavia ääri-ilmiöitä ovat helteet, kireät pakkaset, runsaat sateet ja niukkasateiset jaksot. Vaaraa aiheuttavia ääri-ilmiöitä, kuten myrskyjä, maa-alueiden kovien tuulia, lumipyryjä, jäätäviä sateita ja lumen kinostumista, on käsitelty toisaalla (*Gregow et al., 2008a, b*). Tulevia muutoksia arvioidaan seuraaville suureille: keskilämpötila, keskimääräinen sadesumma, minimi- ja maksimilämpötilat, sadepäivät, rankkasateet, poutajaksot, pakkaspäivät, lumipeite ja pilvisuus sekä termisten vuodenaikojen ja kasvukauden pituus.

Hankkeen viidestä osiosta yksi on erityisesti keskittynyt vuorovaikutukseen muiden tutkimushankkeiden kanssa. Sen yhteydessä hankkeelle laadittiin verkkosivusto³, joka antaa tuoretta tietoa hankkeen tuloksista ja jatkovaiheen etenemisestä.

³www.fmi.fi/acclim

2 Aineistot

2.1 Ilmastohavainnot

Tätä raporttia varten on hyödynnetty sekä asemakohtaista että hilamuotoista havaintoaineistoa:

- Keskeisten sääsuureiden ääriarvojen esiintymistodennäköisyydet tähänastisessa ilmassa on laskettu noin kymmenen eri puolella Suomea sijaitsevan säähavaintoaseman mittaustietojen pohjalta (*Venäläinen et al., 2007a*). Tarkasteluun mukaan otetut havaintoasemat valittiin niin, että tulokset tuovat esiin ilmaston alueellista vaihtelua. Tarkasteltujen suureiden vuorokautiset havaintoaikasarjat ovat tyypillisesti runsaan 50 vuoden pituisia, joskin pidempiäkin aikasarjoja on jo saatettu digitaliseen muotoon (liite 1). Pitimmät aikasarjat ovat peräisin Helsingin Kaisaniemestä, josta vuorokautisia ylimpiä, alimpia ja keskilämpötiloja, samoin kuin kuukausisademääriä, on käytettävissä yli 150 vuoden ajalta.
- Perusjakson 1971–2000 ilmastoa luonnehtimaan käytettiin Suomen koko säähavaintoverkostolla päivittäin tehdyistä lämpötila- ja sademäärämittauksista muodostettua hilaruudukkoaineistoa (*Venäläinen et al., 2005*). Hilaruudukon tiheys on $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$. Interpoloimiseen käytettiin menetelmää, joka ottaa huomioon maaston korkeuden vaihteluiden sekä rannikon ja vesistöjen vaikutukset. Alunperin aineisto sisälsi vuorokauden keskilämpötilan ja sademäärän, sittemmin mukaan on saatu myös vuorokauden ylin ja alin lämpötila.

2.2 Maapallonlaajuiset ilmastomallit

Maapallolla ilmakehän ja valtamerien virtaukset eivät kunnioita valtioiden rajoja. Ilmaston muuttuminen on maailmanlaajuinen ongelma, ja eri puolilla maapalloa esiintyvät muutokset ovat vahvasti kytköksissä toisiinsa. Siksi tulevaa ilmastoa ennustettaessa perustyökäluna tulee olla matemaattis-fysikaalinen malli, joka simuloi ilmastoa koko maapallon alueella, ottaen huomioon niin ilmakehässä, merissä kuin maan pinnallakin tapahtuvat muutokset. Pelkästään yhden mallin ja sillä tehtyjen ilmastosimulaatioiden asemesta on lisäksi suositeltavaa vertailla keskenään eri tutkimuslaitoksissa kehitettyjen mallien tuloksia.

Ilmastoennusteiden pohjana käyttämämme maapallonlaajuiset ilmastomallit on esitelty liitteessä 2. Mallit kuvaavat esimerkiksi merijään ja Pohjois-Atlantin pohjois-eteläsuuntaisen kiertoliikkeen⁴ asteittaisia muutoksia kuluvan vuosisadan aikana. Sen sijaan kasvipeitteen ja ilmaston välisiä kytköksiä nämä mallit kuvaavat vajavaisesti, mannerjäätiköiden muutoksia eivät ensinkään. Voidaankin otaksua, että ne eivät pysty ainakaan kunnolla kuvaamaan epälineaarisia, tietyn kynnsarvon jälkeen nopeasti voimistuvia muutoksia, joita ovat tarkastelleet mm. *Pimenoff et al. (2008)*.

⁴Meriveden tiheyserojen aiheuttama kolmiulotteinen virtauskenttä, jota kutsutaan myös termohaliiniseksi kiertoliikkeeksi, koostuu tuulien synnyttämistä lämpimistä pintavirtauksista, kuten Golfvirrasta ja siitä haarautuvasta Pohjois-Atlantin virrasta, sekä kylmistä syvän meren paluuvirtauksista.

Ilmastomalleilla tehtyjen ajojen tulostiedostot ovat peräisin kansainvälisestä tietopankista⁵. Tietoja oli saatavilla kaiken kaikkiaan 22 mallista, mutta useimmissa laskelmissamme kolme näistä malleista hylättiin, koska niiden antamat tiedot Pohjois-Euroopan ilmastosta eivät vaikuttaneet uskottavilta (tarkempi perustelu liitteessä 2). Näitä maapallonlaajuisia mallikokeita kutsutaan yleisesti myös ns. CMIP3-ajoiksi. Niiden tulostiedot sisälsivät ilmastosuureiden arvoja kuukaudesta ja vuodesta toiseen, ja ne oli annettu kunkin mallin alkuperäisessä hilapisteikössä, joka vaihteli mallista toiseen. Lisäksi mm. ajojen pituudet vaihtelivat malleittain jonkin verran. Tulostietoja yhtenäistämällä ja analysoimalla saatiin laskettua ilmastoskenaarioita halutuille alueille ja ajanjaksoille.

Koska maapallonlaajuiset ilmastomallit ovat hyvin monimutkaisia ja koska niitä käytetään toisinaan jopa useiden vuosisatojen ilmaston simuloimiseen, niissä on laskentapisteitä melko harvassa (liite 2). Karkean erotuskykynsä takia ne eivät kykene simuloimaan kunnolla esimerkiksi pienialaisia säähäiriöitä, jollaiset joskus tuottavat suuria sademääriä. Maapallonlaajuisien ilmastomallien tuottamia tuloksia voidaan pyrkiä tarkentamaan alueellisten ilmastomallien avulla. Tällöin on kuitenkin pidettävä mielessä alueelliseen tarkentamiseen sisältyvät rajoitteet.

2.3 Alueelliset ilmastomallit

Tiheän laskentapisteikkönsä ansiosta rajoitetun alueen ilmastomallit pystyvät kuvaamaan Itämeren, vesistöjen ja pinnanmuotojen vaikutukset ilmastoon paremmin kuin maailmanlaajuiset mallit. Ne ovat tarkempia myös sääilmiöiden yksityiskohtien simuloinnissa. Niinpä niitä on perusteltua käyttää tutkittaessa voimakkaiden rankkasateiden ja muidenkin sään ääri-ilmiöiden muutoksia.

Tällaiset alueelliset mallit vaativat aina tuekseen maailmanlaajuisen mallin laskemia tuloksia alueensa reunoilla. Esimerkiksi Euroopan ja Pohjois-Atlantin päivittäisiin säävaihteluihin vaikuttaa voimakkaasti se, millaiset ilmavirtaukset vallitsevat tuon alueen ulkopuolella. Reuna-arvotietojen vaikutus alueellisen mallin tuloksiin on siis hyvin merkittävä. Näiden reuna-arvotietojen siirtäminen maailmanlaajuiselta mallilta alueelliselle mallille on haastavaa ja työlästä. Tämän vuoksi kutakin yksittäistä alueellista mallia käytetään yleensä vain korkeintaan muutaman globaalin mallin tarkentamiseen. Reuna-arvotietojen vaikutus alueellisen mallin tuloksiin voi olla hyvin merkittävä. Pelkästään alueellisten mallien tuloksia tarkastelemalla ei siten saa kattavaa käsitystä siitä, miten suuri epävarmuus ilmastomuutoksen ennusteisiin voi sisältyä.

Käyttämämme alueelliset malliaineistot ovat pääosin peräisin PRUDENCE-hankkeen aikana useissa eri mallikeskuksissa tehdyistä simulaatioista (*Christensen et al., 2007*). Liitteessä 3 esitelty mallikokoelma on pitkälti sama kuin mitä käytettiin jo FINADAPT-hankkeen yhteydessä (*Carter et al., 2005*). Lisäksi mukaan on otettu ruotsalaisen Rossby-keskuksen uusimman malliversion (RCA3) ajoja. Erona aiempaan on myös se, että sadesuureiden osalta Suomen alue-

⁵Kyseessä on kansainvälisen ilmastomallien vertailuhankkeen (CMIP3) tietopankki, johon on talletettu mm. Hallitustenvälisen ilmastopaneelin 4. arviointiraportin (*IPCC, 2007*) laadinnassa käytettyjen mallien tuloksia (*Meehl et al., 2007*).

keskiarvot on laskettu jättäen lähimpänä merenrannikkoa olevat hilapisteet huomiotta, samoin yhden mallin tulokset kesän ja syksyn sadesuureille on jätetty pois (perustelut liitteessä 3).

3 Menetelmät

Tämä luku kertoo käytetyistä menetelmistä etenkin tulosten soveltamisen kannalta. Yksityiskohtaisempaa tietoa annetaan liitteiden ja kirjallisuusviitteiden avulla. Erityisesti kannattaa huomata, että tässä raportissa puhutaan kahdenlaisista todennäköisyyksistä. Ääri-ilmiöiden yhteydessä tarkastellaan esiintymistodennäköisyyksiä, esimerkiksi sitä, mikä on hellerajan ylittymisen todennäköisyys. Arvioitaessa tulevaa ilmastoa mielenkiinnon kohteena on puolestaan muutoksen suuruuden todennäköisyys, esimerkiksi se, millä todennäköisyydellä kevään keskilämpötila on kahden vuosikymmenen kuluttua vaikkapa vähintään puolitoista astetta korkeampi kuin vertailujakson 1971–2000 vastaava keskiarvo.

3.1 Sään ääriarvojen toistuvuuden arviointi

Sääilmiöiden vaikutuksia selvitettäessä ja niihin varauduttaessa on monesti tärkeää olla tietoa ilmiön keskiarvon lisäksi sen ääripäiden esiintymisestä. Tarvitaan esimerkiksi tietoa siitä, kuinka usein ja miten pitkäksi aikaa lämpötila laskee hyvin alas tai kohoaa hyvin korkealle, kuinka suuri on keskimäärin kerran kymmenessä vuodessa ylittyvä tuulen nopeus tai miten usein sataa kymmeniä millimetrejä muutamassa tunnissa.

Ilmaston ääri-ilmiöt voidaan määritellä sen mukaan, kuinka harvinaisia tai voimakkaita ne ovat, mutta myös sen mukaan, miten vakavasti ne vaikuttavat yhteiskuntaan ja ympäristöön. Harvinaisen tapahtuman määritelmät vaihtelevat, mutta tyypillisesti rajana pidetään kyseisen sääilmiön todennäköisyysjakauman 10. tai 90. prosenttipistettä⁶.

Yksinkertaisimmillaan prosenttipisteet voidaan määrittää kokeellisesti asettamalla havaitut arvot suuruusjärjestykseen. Yleensä kuitenkin lähdetään ajatuksesta, että havaitut arvot ovat otos jakaumasta, jonka muoto saataisiin tarkalleen selville, jos havaintoja olisi ääretön määrä. Tavoitteena on arvioida tämän jakauman muotoa käytettävissä olevien havaintojen perusteella. Menetelmiä on useita:

- a. Pyritään löytämään jakauma, joka sopii mahdollisimman hyvin koko havaintojoukkoon. Tällaisia koko aineistoon sovitettavia jakaumia ovat esimerkiksi normaalijakauma, log-normalijakauma ja gammajakauma. Varsinkin normaalijakauman tapauksessa tyypilliset, usein esiintyvät arvot määräävät pitkälti myös todennäköisyysarvot jakaumien hännillä.
- b. Tasoitetaan koko havaintojoukosta muodostettu diskreetti frekvenssijakauma jatkuvaksi jakaumaksi ns. Gaussin ydintä käyttäen. Valitun tasoituksen voimakkuudesta riippuu, kuinka paljon jakauman "sisäosat" vaikuttavat saatuihin todennäköisyyksiin jakauman ääripäissä (*Räisänen ja Ruokolainen, 2008a, b*).

⁶Jakauman 90. prosenttipiste on arvo, jota pienempiä on 90 % ja suurempia 10 % kaikista arvoista. Mediaani on sama kuin 50. prosenttipiste.

- c. Keskitytään varsinaisen kiinnostuksen kohteena oleviin (itseisarvoltaan) suuriin arvoihin ja sovitetaan niihin ääriarvojakauma. Esimerkiksi vuotuisiin maksimiarvoihin käytetään ns. yleistettyä ääriarvojakaumaa (GEV) ja tietyn kynnsarvon ylittäviin tapauksiin sovelletaan ns. yleistettyä Pareto-jakaumaa (liite 4).

Vaihtoehtoista ensimmäistä on käytetty esimerkiksi Rankkasateet ja taajamatulvat (RATU)-hankkeessa (Aaltonen *ym.*, 2008). Tässä tutkimuksessa on puolestaan sovellettu kahta jälkimmäistä tapaa (lisää hieman tuonnempana).

Prosenttipisteiden ja esiintymistodennäköisyyksien lisäksi ääriarvojen yhteydessä käytetään usein käsitteitä toistuvuus aika ja toistuvuustaso⁷. Esimerkiksi vuoden suurimman vuorokautisen sademäärän tai vaikkapa tammikuun keskilämpötilan jakauman 95. prosenttipiste tarkoittaa arvoa, joka ylittyy vuoden aikana 5%:n todennäköisyydellä. Mikäli todennäköisyys ei muutu ajan kuluessa, vähintään tämän suuruinen arvo siis toistuu keskimäärin 20 vuoden välein. Kyseistä 20 vuoden toistuvuus aikaa vastaavaa arvoa eli 95. prosenttipistettä kutsutaan 20 vuoden toistuvuustasoksi.

Havaintotiedon niukkuus rajoittaa ääri-ilmiöiden tutkimista. Jotta ääriarvojen esiintymistodennäköisyyksiä voitaisiin arvioida luotettavasti, tarvitaan mahdollisimman pitkiä ja tasalaatuisia mittausaikaasarjoja. Etenkin harvoin sattuvien ilmiöiden todennäköisyyksien arviointi lyhyiden mittausaikaasarjojen perusteella on erittäin epävarmaa. Suurin osa Suomen säähavaintoosiemien vuorokausiaineistoista on digitalisoitu ainoastaan vuodesta 1961 eteenpäin. Nämä runsaan 50 vuoden pituiset aikasarjat (liite 1) ovat varsin lyhyitä ääri-ilmiöiden analysoinnin kannalta. Koska laskettujen esiintymistodennäköisyyksien käyttäjän kannalta on tärkeää tietää, miten luotettavina tuloksia voi pitää, parhaan arvion lisäksi toistuvuustasojen epävarmuusvälit. Tässä tutkimuksessa olemme käyttäneet toistuvuustasojen epävarmuusvälinä 95%:n luottamusrajoja (liite 4). Lisäksi tarkastellaan, kuinka paljon tulokset vaihtelevat 30-vuotisjaksosta toiseen, kun analysoidaan pitkä likimain trenditön aikasarja. Tällaisen muodostavat vuoden ylimmät lämpötilat Helsingin Kaisaniemessä viimeisen noin 150 vuoden ajalta.

Sen sijaan Helsingissä mitatut vuoden alimmat lämpötilat, samoin kuin kuukausittaiset keskilämpötilat eivät muodosta trendittömiä aikasarjoja, vaan niissä näkyy lämpenevä suuntaus. Monien ääri-ilmiöiden tapauksessa on kuitenkin niin, että mitä harvinaisempi tapahtuma on, sitä vaikeampaa on saada selville pitkäaikaisia muutoksia sen esiintymisessä. Tämä johtuu yksinkertaisesti siitä, että tällaisia tapauksia on ollut kovin vähän. *Venäläisen ym. (2007a)* raportin liitteisiin kootut tulokset eivät ota huomioon mahdollisten pitkäaikasten trendien vaikutusta toistuvuustasoihin, koska useimmille suureille käytettävissä olevat noin 50 vuoden pituiset havaintosarjat ovat liian lyhyitä harvinaisten ilmiöiden trendien arvioimiseksi. Ilmaston muuttuessa muuttuvat samalla kuitenkin myös vuosien välistä vaihtelua kuvaavat todennäköisyysjakaumat. Aiemmista havainnoista suoraan johdetut toistuvuusajat ja -tasot eivät siksi enää sellaisenaan päde nykyisessä tai tulevassa ilmastossa, eivät etenkin lämpötilasuureille. Käsittelemme tätä asiaa pisimpien aikasarjojen eli Helsingin lämpötilahavaintojen avulla käyttäen kolmea eri tapaa:

⁷Toistuvuus aika on kääntäen verrannollinen todennäköisyyteen, ja se kuvaa aikaa, jonka kuluessa ilmiön voidaan odottaa esiintyvän keskimäärin kerran. Toistumistaso puolestaan kertoo suureen arvon, joka ylittyy (tai alittuu) keskimäärin yhden kerran tarkasteltavan jakson aikana.

- (i) Sovelletaan edellä mainittua c-menetelmää havaintoihin siten, että ääriarvojakauma sovitetaan erikseen aikasarjan eri osiin, esimerkiksi peräkkäisiin 30-vuotisjaksoihin, ja tarkastellaan jakauman muuttumista tai vaihtelua ajanjaksojen välillä.
- (ii) Tarkastellaan yhdellä kerralla koko havaintoaikasarjaa, mutta hyödynnetään sitä, että ääriarvojakauman määrittelevien kolmen parametrin ei tarvitse olla vakioita. Havaintoihin voi parhaiten sopia esimerkiksi GEV-jakauma, jonka ns. sijaintiparametri muuttuu ajan tai vaikkapa läntisten ilmapvirtausten voimakkuutta kuvaavan NAO-indeksin mukana. Tällöin myös jakauma ja siitä laskettavat toistuvuusajat muuttuvat (liite 4).
- (iii) Arvioidaan todennäköisyysjakaumien muuttumista ilmastomallitulosten perusteella. Tarkasteltavina eivät ole pelkästään harvinaiset arvot, vaan suureen koko jakauma “sisäosineen” (b-tapa). Nykyistä tai tulevaa ilmastoä edustava todennäköisyysjakauma muodostetaan aiempia havaintoarvoja muokkaamalla. Uutta jakaumaa laskettaessa otetaan huomioon maapallon keskilämpötilan tähänastinen vaihtelu sekä ilmastomallien tulokset (liite 7). Menetelmä perustuu havaintoon, ettei ilmastomallien simuloima ilmastomuutosten maantieteellinen jakauma näyttäisi suuresti muuttuvan ajan funktiona (liite 6).

Menetelmää (i) käytettiin Helsingin vuoden ylimpiin ja menetelmää (ii) alimpiin lämpötiloihin, menetelmää (iii) puolestaan saman havaintoaseman joulu- ja maaliskuun keskilämpötiloihin. Lisäksi ilmastomallikokeiden perusteella tutkittiin kesä- ja talvikuukausien ylimpien ja alimpien lämpötilojen prosenttipisteiden muuttumista vuosisadan viimeiseen kolmannekseen mennessä; tosin tässä tarkastelussa oli mukana vain yhden alueellisen mallin tuloksia.

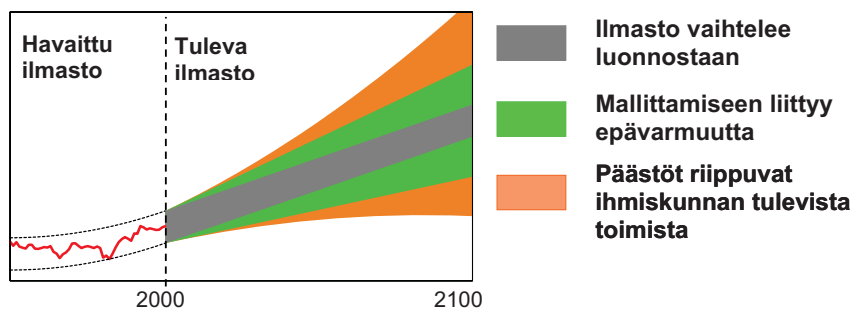
3.2 Ilmastoennusteiden epävarmuuslähteet

Arviot ilmaston muuttumisesta tulevaisuudessa perustuvat maailmanlaajuisiin ilmastomalleihin, joiden tarkoituksena on kuvata ilmakehän, merien, lumen ja jään, kasvipeitteen sekä maaperän käyttäytymistä ja vuorovaikutuksia. Ilmastojärjestelmän toiminnan simuloinnissa joudutaan kuitenkin tekemään huomattavia yksinkertaistuksia, joten täydellistä kuvausta luonnosta ei malleilla voida saavuttaa. Ja vaikka tällainen täydellinen malli pystyttäisiin kehittämään, tulevaisuuden ilmastoä ei silloinkaan olisi mahdollista ennustaa tarkkaan. On olemassa kolme tekijää, jotka aiheuttavat ennustuksiin epävarmuutta:

- Kasvihuonekaasujen ja pienhiukkasten pitoisuudet ilmakehässä. Pitoisuuksien muutokset riippuvat mm. väestönkasvusta, kulutuksen määrästä, kansantalouden energiaintensiivisyydestä sekä energian tuotantotavoista (fossiiliset polttoaineet vs. kasvihuonekaasuja tuottamattomat energianlähteet), samoin kuin näiden aineiden kierrosta ilmakehän, meren ja biosfäärin välillä. Kasvihuonekaasu- ja pienhiukkasskenaarioista on kerrottu tämän raportin liitteessä 5.
- Ilmastomallien väliset erot. Mm. tietokoneiden suorituskyvyn rajallisuuden takia monet ilmastoon vaikuttavat ilmiöt joudutaan laskemaan malleissa likimääräisesti, ja eri malleissa on päädytty erilaisiin ratkaisuihin. Siksi mallit antavat toisistaan poikkeavia tulok-

sia, vaikka niille olisi annettu syöttötietona täsmälleen sama ilmakehän koostumuksen muutos.

- Luonnollinen vaihtelu. Joinakin vuosikymmeninä ilmavirtaukset saattavat esimerkiksi puhallella tavallista useammin kylmiltä ilmansuunnilta, joinakin toisina taas lämpimiltä. Kylmien ilmavirtausten ollessa vallalla ilmaston lämpeneminen tilapäisesti pysähtyy tai jopa kääntyy viilenemiseksi. Kun lämpimät tuulet myöhemmin jälleen yleistyvät, ilmastomuutos näyttää harppaavan nopeasti eteenpäin.



Kuva 1: Epävarmuustekijöiden vaikutus eripituisissa ilmastoennusteissa kaavamaisesti esitettyinä. Kuviossa vaak-akselina on aika, pystyakselina ilmastosuureen (esim. lämpötila tai sademäärä) arvon vaihtelu. Punainen käyrä esittää tähän mennessä havaittuja vaihteluita. Värityt alueet kuvaavat ilmastoennusteen epävarmuutta nykyhetkestä eteenpäin eri tekijöistä johtuen: ilmastojärjestelmässä esiintyvä luonnollinen vaihtelu (harmaa), ilmastomallien väliset erot (vihreä) ja kasvihuonekaasujen pitoisuuden muuttuminen ilmakehässä (oranssi). Huomattakoon, että eri tekijöiden osuus vaihtelee suuresti tapauksesta riippuen. Esimerkiksi luonnollisen vaihtelun osuus on selvästi pienempi, kun tarkastellaan suuremman alueen ja/tai pitemmän jakson keskiarvoa. Toisaalta luonnollinen vaihtelu on suhteessa suurempaa sademäärän kuin lämpötilan ennusteissa.

Eri epävarmuustekijöiden tärkeyttä lyhyellä ja pidemmällä tähtäimellä on hahmoteltu kuvassa 1. Esimerkiksi hiilidioksidin päästöjen muutokset vaikuttavat kaasun pitoisuuden kehitykseen toden teolla vasta muutaman kymmenen vuoden viipeellä. Sen tähden eri kasvihuonekaasuskenaarioiden väliset erot alkavat näkyä ilmastossa vasta vuosisadan puoliväliä lähestyttäessä, kun taas lähivuosikymmeninä ilmastonmuutos etenee kaikissa skenaarioissa melko lailla samaa tahtia. Toisaalta arvioitaessa vuosisadan lopulla vallitsevaa ilmastoa kasvihuonekaasujen päästöt ovat epävarmuustekijöistä tärkein.

Mallien väliset erot vaikuttavat ilmastoennusteisiin jo vuosisadan alkupuolella, mutta niidenkin merkitys kasvaa vuosisadan vanhetessa. Kymmenen–kahdenkymmenen vuoden tähtäimellä ylivoimaisesti eniten epävarmuutta aiheutuu ilmaston luonnollisesta vaihtelusta. Luonnollisen vaihtelun aiheuttama epävarmuus toisaalta kasvaa ennustusajan pidentyessä vain hitaasti, joten pitkissä ilmastoennusteissa se jää kahden muun epävarmuustekijän varjoon.

3.3 Muutosten todennäköisyysjakaumien laadinta

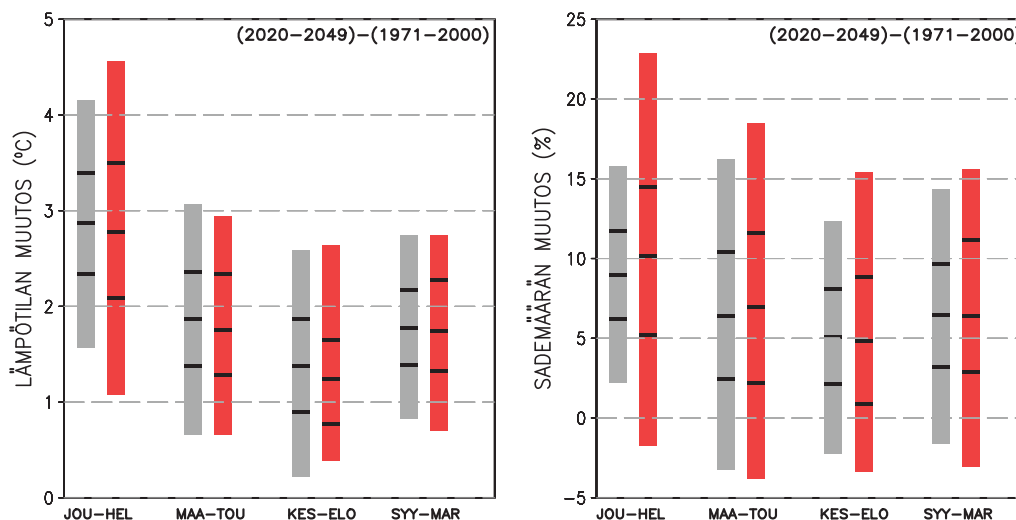
Koska ilmastoennusteet siis ovat vielä melko epävarmoja, monia sovellutuksia varten on järkevää antaa ilmastosuureen muutokselle yhden lukuarvon asemesta todennäköisyysjakauma. Ja koska vuosisadan alku- ja loppupuolta tarkasteltaessa epävarmuutta aiheuttavat tekijät poikkeavat toisistaan, kehitettiin kaksi eri menetelmää, joiden avulla tällaisia muutosten todennäköisyysjakaumia voitiin laskea maailmanlaajuisten ilmastomallien aineistoista:

- (A) Uudelleenotantamenetelmään perustuva lähivuosisikymmenien ilmaston ennustaminen. Tämän menetelmän avulla pyritään laskemaan todennäköisyysjakaumia suoraan tulevaisuudessa toteutuville lämpötilan ja sademäärän muutosten 10-vuotiskeskiaarjoille, ottamatta kantaa siihen, missä määrin esimerkiksi lämpötilan muutos johtuu nimenomaan kasvihuoneilmiön voimistumisesta. Tarkoituksena on siis antaa mahdollisimman totuudenmukainen arvio luonnollisen vaihtelun ja ilmastonmuutosmallien erojen yhdessä aiheuttamasta epävarmuudesta. Koska lyhyellä aikavälillä kaikkien kasvihuonekaasuskenaarioiden mukaiset pitoisuudet lämmittävät ilmastoa suunnilleen yhtä paljon, näissä laskelmissa tarkastellaan vain yhtä skenaariota, A1B:tä. Menetelmää on kuvattu liitteessä 6.
- (B) Luonnollisen vaihtelun aiheuttaman hälyn osuuden minimoiva ja kasvihuonekaasujen pitoisuuksien epävarmuudet huomioiva menetelmä. Tavoitteena on saada esille varsinainen ilmastonmuutossignaali ja sen epävarmuusaste, joka siis johtuu toisaalta mallien erilaisuudesta, toisaalta kasvihuonekaasujen pitoisuuksien tulevasta kehityksestä. Muutoksen todennäköisyysjakaumaa laskettaessa otettiin huomioon kaikki ne kolme kasvihuonekaasuskenaariota (A1B, A2 ja B1), joille malliajoja oli käytettävissä; kunkin kasvihuonekaasuskenaarion toteutuminen oletettiin yhtä todennäköiseksi. Hälyä vähennettiin pitäytymällä tarkastelemaan pitkien, 30 vuoden pituisten jaksojen (esim. jaksot 2040–2069 ja 2070–2099) keskiarvoja. Osasta malleista oli saatavissa kutakin kasvihuonekaasuskenaariota kohti useita rinnakkaisia malliajoja, ja hälyn pienentämiseksi entisestään käytettiin näille malleille rinnakkaisajojen tulosten keskiarvoa. Lisäksi epävarmuusanalyysin tulokset esitetään yksittäisten paikkakuntien tai hilapisteiden asemesta koko Suomen keskiarvoina,⁸ mikä sekin vähentää hälyn osuutta. Tätä laskentamenetelmää on selitetty tarkemmin liitteessä 8.

Uudelleenotantamenetelmää (A) käytettiin laskettaessa 10-vuotisjaksojen todennäköisyysjakaumia lähivuosisikymmenien ajalle. Muutoin todennäköisyysjakaumat tuotettiin jälkimmäisen menetelmän avulla. Molemmissa tapauksissa ennusteet laadittiin erikseen sekä jokaiselle vuoden kuukaudelle, neljälle vuodenajalle että koko vuodelle keskimäärin. B-menetelmän tuottamat yksittäisten kuukausien ilmastoennusteet “yhteismitallistettiin” niin, että kuukausitason ennusteiden epävarmuusasteet vastasivat vuodenaikaisennusteiden epävarmuutta. Käytännössä tämä toteutettiin kaventamalla hieman kuukausitason ennusteiden epävarmuushaarukkaa. Menettelyä on perusteltu liitteessä 8. Huomattakoon, että yhteismitallistus ei vaikuta lainkaan jakauman mediaaniin.

⁸Suomen lisäksi ennusteita laadittiin joukolle muitakin alueita (Pohjois-Eurooppa, Komi, jne.), sekä myös erikseen maamme etelä- ja pohjoisosalle (jaettuna noin leveyspiirin 64°N kohdalta).

Muutosten todennäköisyysjakaumista esitetään joukko prosenttipisteitä, joista mediaani (50. prosenttipiste) edustaa malleihin perustuvaa “parasta arviota”. Muutoksen epävarmuushaarukkaa voidaan kuvata esimerkiksi 90% todennäköisyysvälillä, joka ulottuu 5:nneestä 95:nteen prosenttipisteeseen. Näin ollen käytettävissä olevan mallitiedon perusteella todennäköisyys, että muutos jää tämän epävarmuusvälin alarajaa pienemmäksi, on 5% — samaten todennäköisyys sille, että haarukan yläraja ylittyy.



Kuva 2: Suomen alueen keskilämpötilan (vasen kuva) ja sademäärän (oikea kuva) muuttuminen siirtyäessä jaksosta 1971–2000 jaksoon 2020–2049; laskentamenetelmien vertailua. Punaiset pylväät kuvaavat muutoksen todennäköisyysjakaumaa A-menetelmän (uudelleenotanta) antamana. Harmaat pylväät esittävät vastaavan todennäköisyysjakauman käytettäessä B-menetelmää, jossa luonnollisen vaihtelun osuus on pyritty minimoimaan. Pylvään alapää esittää muutokselle laskettua 5%, yläpää 95% pistettä. Muut prosenttipisteet (25%, 50% ja 75%) on merkitty mustin vaakaviivojin. Pylväsparit vasemmalta oikealle kuvaavat eri vuodenaikoja (joulu–helmikuu, maaliskuu–toukokuu, kesä–elokuu ja syys–marraskuu).

Todennäköisyysjakaumien kahta laskentamenetelmää on vertailtu kuvassa 2. Tarkastelussa on käytetty 30 vuoden mittaista jaksoa ja koko Suomen alueen keskiarvoa, jolloin luonnollisen vaihtelun vaikutus on jo saatu useimmissa tapauksissa kohtuullisen pieneksi⁹. Talvea lukuunottamatta molemmat menetelmät antavatkin lämpötilan muutokselle melko lailla saman todennäköisyysjakauman. Talvellakin lämpötilamuutoksen mediaani on lähes sama, mutta A-menetelmä antaa muutokselle selvästi suuremman epävarmuusvälin. Myös sademäärälle mediaanit ovat melko lähellä toisiaan. Epävarmuusvälit poikkeavat toisistaan enemmän kuin lämpötilalle, mikä oli odotettua, onhan luonnollisen vaihtelun osuus muutoksen epävarmuudessa sademäärällä suurempi kuin lämpötilalla. Ero menetelmien välillä on jälleen huomattavin talvella.

Vertailun perusteella voidaan siis sanoa, että molemmat menetelmät antavat varsin samanlaiset parhaat arviot muutoksen suuruudesta. Todennäköisyysennusteen ääripäät ovat sen sijaan herkempiä käytetylle menetelmälle ja siten epävarmempia.

⁹Tutkittava tapaus ei siten ole sellainen, johon uudelleenotantamenetelmä varsinaisesti on tarkoitettu. Toisaalta tässä vaiheessa eri kasvihuonekaasuskenaariotkaan eivät vielä poikkea toisistaan paljoa. Kyseessä on siis tavallaan menetelmien vertailun kannalta “puolueeton” tilanne.

B-menetelmää käytettäessä kävi ilmi, että kolme SRES-skenaariota yhdistävästä todennäköisyysjakaumasta saatu muutoksen mediaani on lähes sama kuin A1B-skenaariota vastaavan jakauman mediaani (lämpötilalle ero luokkaa 0,0–0,3°C ja sademäärälle 0–3 prosenttiyksikköä). Yksinkertaisuuden vuoksi onkin monessa tämän raportin karttakuvassa käytetty lämpötila- ja sademäärämuutoksen parhaana arviona suoraan mallien A1B-ajojen keskiarvoa. Sen sijaan tulosten epävarmuushaarukka (eli esimerkiksi 5. ja 95. prosenttipisteiden välinen ero) jäisi vuosisadan jälkipuoliskolla liian kapeaksi, jos huomioon otettaisiin pelkästään A1B-skenaario.

Todennäköisyysjakaumatarkastelua on tässä vaiheessa sovellettu ainoastaan lämpötila- ja sademääräennusteille. Muille ilmastosuureille esitetään eri SRES-skenaarioita vastaavat ilmastomuutosskenaariot mallitulosten keskiarvoina.

Todettakoon vielä, että esitettäviä todennäköisyyksiä on syytä pitää ehdollisina. Ne nimittäin lähtevät oletuksesta, että kasvihuonekaasujen tulevat pitoisuudet osuvat niille käytettyjen skenaarioiden haarukkaan ja että myös ilmastojärjestelmän herkkyys ilmakehän koostumuksen muutoksille saadaan kuvattua nykyisen ilmastomallijoukon avulla. Tähän palataan uudelleen luvussa 5.2.

3.4 Klimatologisten keskilämpötilojen ja sademäärien arviointi

Lämpötilan ja sademäärän klimatologiset eli 30 vuoden keskimääräiset kuukausikeskiarvot tulevassa ilmastossa arvioitiin maailmanlaajuisen mallien antamista tuloksista ns. delta-menetelmällä. Tässä menetelmässä tulevaisuuden lämpötilat saadaan lisäämällä perusjakson 1971–2000 aikaisiin havaittuihin kuukausikeskilämpötiloihin (luku 2.1) mallien ennustamat lämpötilan muutokset. Havaitut sademäärät kerrotaan puolestaan mallien ennustamalla tulevan ja nykyisen sademäärän suhteella.

Vuorokauden keskilämpötilan vuotuinen klimatologinen kulku eri 30-vuotisjaksoina arvioitiin kuukausikeskilämpötilojen perusteella. Vuoden jokaisen päivän klimatologinen keskilämpötila perusjakson aikana laskettiin sovittamalla havaittuihin kuukausikeskilämpötiloihin Fourier-kehitemä (menetelmää on kuvattu tarkemmin *Ruosteenojan et al. (2009)* artikkelikäsikirjoituksessa). Samoin Fourier-kehitemän avulla laskettiin delta-menetelmällä muodostetuista kuukausikeskilämpötilojen ennusteista tulevaa ilmastoa vastaavat päivittäiset klimatologiset lämpötilat. Näin saatu lämpötilan vuotuinen kulku kunakin 30 vuoden jaksoneina oli kauniin sinikäyrämäinen.

Näitä maailmanlaajuisiin malliaineistoihin perustuvia arvioita lämpötilan keskimääräisestä vuotuisesta kulusta käytettiin sen tutkimiseen, miten termiset vuodenaajat ja kasvukauden alkamis- ja päättymisajankohdat sekä kasvukauden lämpösumma keskimäärin muuttunevat.

3.5 Sään vaihtelua kuvaavien indeksien muutosten arviointi

Vuorokauden minimi- ja maksimilämpötilojen nousun sekä päivästä toiseen tapahtuvien säävaihteluiden muutosten arviointia varten hyödynnettiin maailmanlaajuisen mallien asemesta alueellisten ilmastomallikokeiden tuloksia.¹⁰ Sään vaihtelun kuvaamiseen käytettiin erilaisia indeksejä, jotka voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

- maksimi- tai minimiarvot
- tietyn kynnyksarvon ylitykset tai alitukset
- edellisten yhdistelmät ja jatkosuureet.

Ensimmäiseen ryhmään kuuluvat tarkastelemistamme indekseistä vuoden/vuodenajan suurin vuorokautinen sademäärä ja suurin vuorokautinen lumipeitteen vesiarvo. Toiseen ryhmään sijoittuvat sadepäivien (sademäärä vähintään 1 mm/vrk), pakkaspäivien (vuorokauden alin lämpötila alle 0°C), lumipeitepäivien (lumen vesiarvo yli 0 mm) ja nollapistepäivien (vrk:n alin lämpötila alle 0°C ja ylin yli 0°C) lukumäärä. Viimeiseen ryhmään kuuluu pisin sateettoman jakson pituus sekä syksyn ensimmäisestä kevään viimeiseen pakkaseen ulottuvan jakson pituus.

Alueellisia ilmastosimulointeja oli saatavissa kahdeksasta eurooppalaisesta mallikeskuksesta (liite 3). Koska kukin niistä käytti omanlaistaan laskentapisteikköä, interpoloimme laskemamme indeksit yhteiseen säännölliseen hilapisteikköön. Pakkaspäivien määrän ja muiden lämpötilasta riippuvien indeksien interpoloinnissa otettiin huomioon myös maaston korkeuden erilaisuus eri laskentapisteissä.

Vaikka alueellisia mallikokeita oli useita, niillä tarkennettiin vain muutaman maailmanlaajuisen mallin ilmastosimulatioita. Niinpä sään vaihtelua kuvaavien indeksien arviointi perustuu melko suppeaan aineistoon. Sitä vastoin esittämämme keskilämpötilan ja keskimääräisen sademäärän perusskenaariot pohjautuvat peräti noin 20 maapallonlaajuisen CMIP3-mallin tuloksiin (luku 2). Niinpä on syytä tarkastella kahden eri malliaineiston tulosten keskinäistä vertailtavuutta. Tavoitteena on esittää alueellisiin malleihin perustuvia ilmastomuutoskenaarioita, jotka sopivat mahdollisimman hyvin yhteen CMIP3-mallien tulosten kanssa. Lähtökohtana on se,

- (i) miten lämpötilasta (sademäärästä) riippuvan indeksin muutos eroaa alueellisissa malli-ajoissa keskilämpötilan (keskimääräisen sademäärän) muutoksesta,
- (ii) osuvatko alueellisiin malleihin perustuvat keskilämpötilan (keskimääräisen sademäärän) muutosarviot CMIP3-tuloksiin pohjautuvaan epävarmuushaarukkaan, ja
- (iii) mitä tämän perusteella voidaan arvioida indeksin muutoksista, kun otetaan huomioon keskilämpötilan (sademäärän) muutos CMIP3-kokeista.

Alueellisten ilmastosimulointien alkuperäinen perusjakso on 1961–1990. Malliaineistojen tuloksia vertailtaessa perusjakso muutettiin samaksi kuin globaaleilla malleilla (1971–2000) yksinkertaisesti skaalaamalla lineaarisesti ajan suhteen.

¹⁰Myös maapallonlaajuisen CMIP3-mallien aineistoista on saatavissa päivittäisiä minimi- ja maksimilämpötiloja kahdelle tulevalle 20-vuotijaksolle (2046–2065 ja 2081–2100). Näitä on tarkoitus analysoida ACCLIM II-hankkeessa.

4 Tuloksia

4.1 Millaisia lämpötiloja ja sademääriä Suomessa on havaittu keskimäärin kerran 20 tai 50 vuodessa?

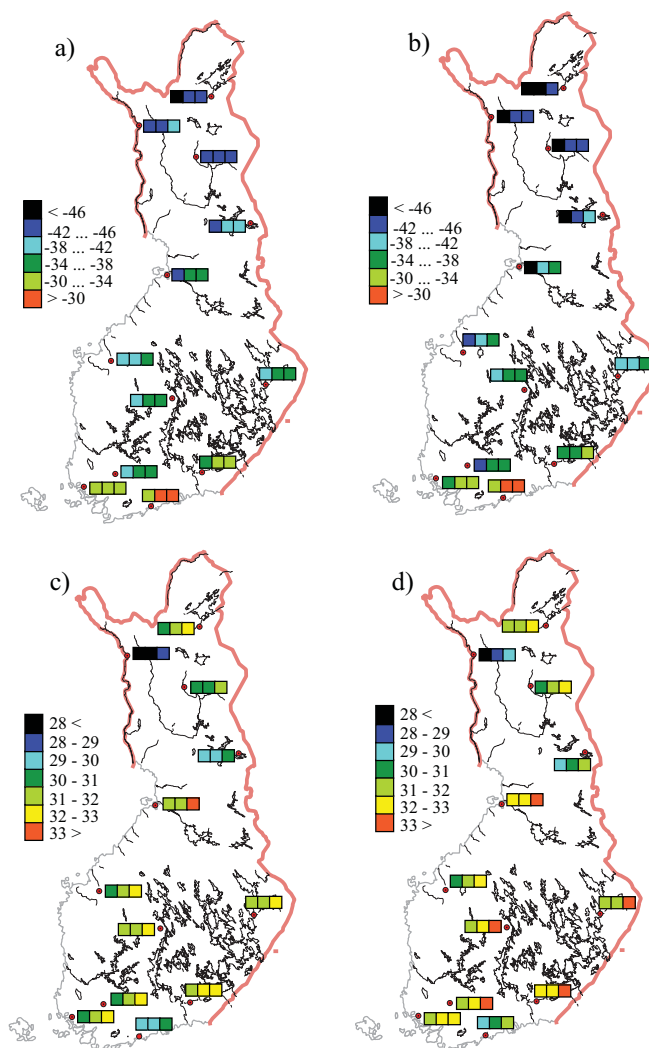
Useiden keskeisten ilmastomuuttujien 10–500 vuoden toistuvuustasot Suomessa menneiden vuosikymmenien aikana tehtyjen havaintojen perusteella on esitetty taulukoin *Venäläisen ym. (2007a)* raportissa. Osasta tuloksista on laadittu myös tieteellinen artikkeli (*Venäläinen et al., 2009*) ja kokousjulkaisuja (*Venäläinen et al., 2007b; Jylhä et al., 2007a, 2007b*). Tähän raporttiin on poimittu joitakin tuon aiemman raportin tuloksia, ja niitä havainnollistetaan graafisesti. Tarkasteltavina ovat toistuvuustasot, joiden vuotuinen esiintymistodennäköisyys on havaintoihin sovitettun ääriarvojakauman mukaan 2% tai 5%. Jos todennäköisyysjakauma ei muutu ajan mukana, nämä vastaavat 50 ja 20 vuoden toistuvuusajoja. Edellinen edustaa poikkeuksellisia ja jälkimmäinenkin harvinaisia tapauksia. Lisäksi tarkastellaan havaintoaikasarjojen pituuden ja alustavasti myös mahdollisen trendin vaikutusta ääriämpötilojen toistuvuustasoja koskeviin tuloksiin; jälkimmäiseen kysymykseen palataan luvussa 4.14.

4.1.1 Kireät pakkaset ja helteet

Helmikuun alin lämpötila laskee tässä tarkastelussa mukana olevilla Pohjois-Suomen asemilla selvästi alle -40 asteen vähintään kerran 20 vuodessa, ja kerran 50 vuodessa päästään noin -45 asteeseen (kuva 3a–b). Helsingin Kaisaniemessä -30 asteen alittuminen on hyvin harvinaista, sillä parhaan arvion mukaan sen toistuvuus aika on yli 50 vuotta. Etelä-Suomen sisämaassa, missä -30°C on puolestaan varsin tavanomainen lämpötila, keskimäärin joka 20. helmikuuta saavutettava lukema on $-36\dots-33^{\circ}\text{C}$, paikoin kylmempikin. Poikkeuksellisen kovat pakkaslukemat, joita esiintyy keskimäärin vain kerran 50 vuodessa, ovat Lapissa jopa noin 17 astetta kylmempiä kuin Etelä-Suomessa. Tämä suuri ero maan eri osien välillä ilmenee myös helmikuun keskimääräisten minimilämpötilojen maantieteellisessä jakaumassa (Solantie ym. 2007). Sitä vastoin heinäkuun korkeimpien maksimilämpötilojen alueellinen jakauma on varsin tasainen: vaihteluväli on vain noin 4,5 astetta (kuvat 3c–d). Noin 20 vuoden välein toistuva helleluku on suuressa osassa maata $31\text{--}32^{\circ}\text{C}$. Rannikolla meri lämmittää talvella ja viilentää kesällä, joten Helsingissä 30°C on lähes yhtä harvinaisen kesällä kuin -30°C talvella.

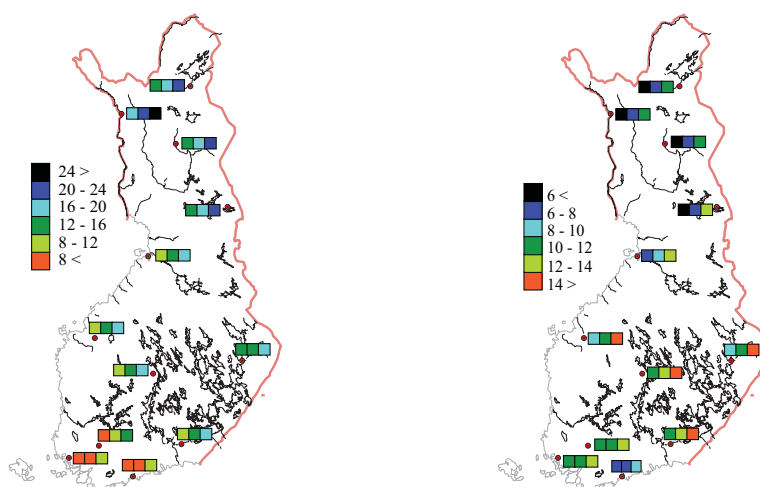
Kuva 4 esittää pakkas- ja hellejaksojen pituuksien 20 vuoden toistuvuustasoja. Hellejaksojen kesto laskettiin havainnoista sen perusteella, kuinka monena peräkkäisenä päivänä vuorokauden ylin lämpötila kohosi yli 25°C , ja kovan pakkasen jaksojen pituudet sen perusteella, kuinka monena peräkkäisenä päivänä lämpötila laski alle -20°C . Lapissa koetaan viikon hellejakso kerran 20 vuodessa ja 10 päivän hellejakso kerran 50 vuodessa. Tutkituista asemista pisimmät eli noin kahden viikon hellejaksot esiintyvät Utissa. Lyhyimpien hellejaksojen Muoniassa pakkasjaksot puolestaan kestävät pisimpään, kerran 20 vuodessa lähes kolme viikkoa ja kerran 50 vuodessa pari päivää sen ylikin. Lyhyimmät, näillä toistuvuusajoilla noin viikon pituiset pakkasjaksot löytyvät rannikolta Turusta ja Helsingistä.

Helsingin havainnoista lasketut vuoden ylimmän lämpötilan toistuvuustasot ovat vaihdelleet 30-vuotisjaksosta toiseen viimeisten noin 150 vuoden aikana, mutta mitään yhtenäistä pitkäaikaisista trendiä ei ole nähtävissä (kuva 5). Korkein 20 vuoden toistuvuustaso ($31,9^{\circ}\text{C}$) saadaan



Kuva 3: Yläriivi: Helmikuun alimman vuorokautisen minimilämpötilan (a) 20 ja (b) 50 vuoden toistuvuustasot. Alariivi: Heinäkuun ylimmän vuorokautisen maksimilämpötilan (c) 20 ja (d) 50 vuoden toistuvuustasot. Havaintoasemien sijainti on näytetty punaisiin pistein, ja värilliset ruudut esittävät toistuvuustasoja celsiusasteina. Keskimmäinen ruutu kertoo parhaan arvion, vasen ja oikea ruutu arvot, joiden välille toistuvuustaso osuu 95%:n todennäköisyydellä.

jakson 1931–1960 havaintojen pohjalta, ja alimpaan toistuvuustasoon ($28,6^{\circ}\text{C}$) päädytään jakson 1871–1900 havaintoja analysoimalla. Ilmaston lämpeneminen ei siis näy ylimmissä lämpötiloissa samalla tavoin kuin se näkyy talvilämpötiloissa (luku 4.14). Kuvasta kuitenkin ilmenee, että 30 vuotta on varsin lyhyt aika 20 vuoden toistuvuustasojen, saati vielä harvinaisempien helteiden arviointiin. Yksittäisen 30-vuotisjakson havainnoista laskettu toistuvuustason paras arvio saattaa nimittäin toisen jakson perusteella jäädä peräti luottamusvälin ulkopuolelle. Vaikka kuvia 3 ja 4 varten käytettiin vähän pidempiä, noin 50 vuoden aikasarjoja, näihinkin toistuvuustasoihin liittyy epävarmuutta, mikä on syytä pitää mielessä. Sekä talvilämpötilojen suuri luontainen vaihtelu että niiden nouseva trendi ajan mukana aiheuttaa sen, että helmikuun kireimpien pakkasasteiden toistuvuustasojen 95%:n luottamusvälit kuvassa 3 ovat vielä leveämpiä kuin heinäkuun helteiden epävarmuusvälit. (Asiaan palataan vielä luvussa 4.14.)

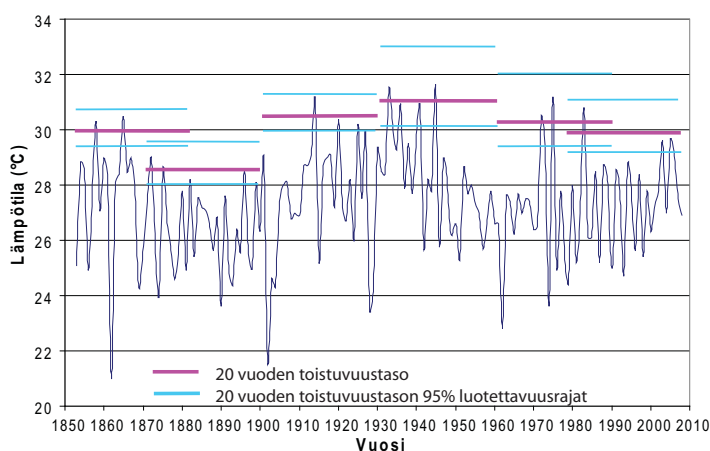


Kuva 4: Kireiden pakkasjaksojen (vasen) ja hellejaksojen (oikea) pituuden (vuorokausina) 20 vuoden toistuvuustasot 95%:n luottamusväleinen. Katso kuvan 3 selitystekstiä.

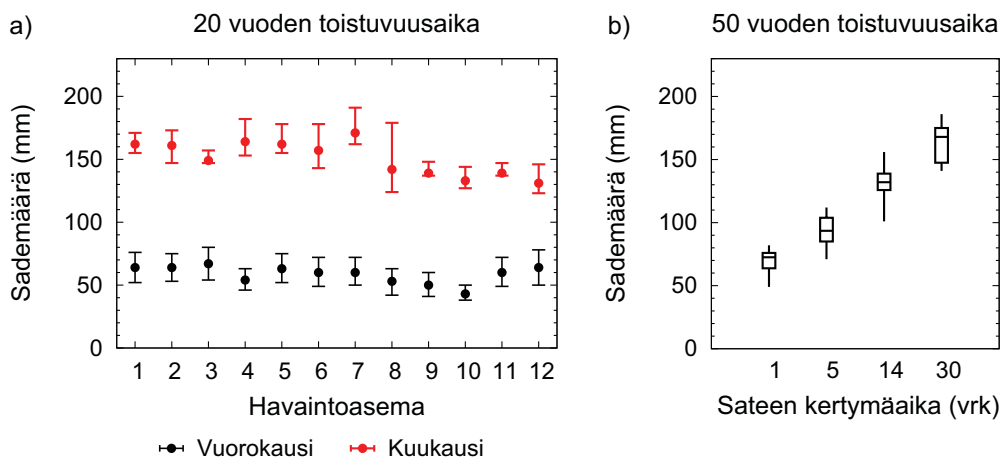
4.1.2 Runsaat sateet

Vuosittain viiden prosentin todennäköisyydellä toistuvat kuukauden ja vuorokauden sademäärät 95%:n luottamusväleinen on esitetty havaintoasemittain kuvassa 6a. Etelä- ja Länsi-Suomessa (havaintoasemat 1–6) keskimäärin kerran 20 vuodessa ylittyvä kuukauden sademäärä on tulosten mukaan noin 160 ± 15 mm. Yhden vuorokauden sademäärälle 20 vuoden toistuvuustaso on tyypillisesti noin 60 ± 10 mm, viiden vuorokauden sateelle 90 ± 15 mm ja kahden viikon sateelle 130 ± 15 mm, pohjoisessa kuitenkin alempi (tarkemmin *Venäläisen ym. (2007a)* raportin liitteissä 6–9).

Asemien väliset erot kuvassa 6 aiheutuvat osittain sadeilmaston erilaisuudesta Pohjois- ja Etelä-Suomen välillä, osin maaston korkeuden vaihteluista (*Solantie ja Pirinen, 2006*) ja osin puhtaasta sattumasta. Pohjois-Suomessa sataa jonkin verran vähemmän kuin Etelä-Suomessa, ja tämä heijastuu harvinaisen suurten kuukausisademäärien toistuvuustasoihin:



Kuva 5: Vuoden korkein vuorokauden maksimilämpötila Helsingin Kaisaniemessä: havaitut arvot v. 1853–2008 sekä 20 vuoden toistuvuustasot 95%:n luottamusrajoineen eri 30 vuotisjaksojen aikana.



Kuva 6: (a) 20 vuoden toistuvuusajkaa (5%:n vuotuista esiintymistodennäköisyyttä) vastaavat kuukauden (punaisella) ja yhden vuorokauden (mustalla) sademäärät havaintojen perusteella. Parhaan arvion (ympyrä) lisäksi on näytetty 95%:n luottamusvälit. Havaintoasemat 1–12 on lueteltu liitteessä 1. (b) 50 vuoden toistuvuusajkaa (2%:n vuotuista esiintymistodennäköisyyttä) vastaavat yhden, viiden ja 14 vuorokauden sekä kuukauden sademäärät; parhaiden arvioiden vaihtelu 12 havaintoaseman välillä. Näytettyinä ovat (alhaalta ylös) minimi, 25. prosenttipiste, mediaani, 75. prosenttipiste ja maksimi.

Pohjois-Suomen asemilla 50 vuoden toistuvuustasot ovat yleisesti pienempiä kuin Etelä- ja Keski-Suomen 20 vuoden toistuvuustasot. Ero Etelä- ja Pohjois-Suomen välillä näkyy myös 14 vuorokauden sademääriä koskevissa tuloksissa. Mitä lyhyemmän ajanjakson sateita tarkastellaan, sitä suurempi on sattuman osuus. Niinpä kuvan 6 sadeasemat eivät paljasta alle viikon kestävien runsaiden sateiden esiintymisessä selvää eroa esimerkiksi kahden eteläisimmän ja kahden pohjoisimmän asemien välillä. RATU-hankkeessa tehty huomattavasti laajempi tutkimus osoitti kuitenkin, että suurten vuorokausisateiden esiintymistodennäköisyys pienenee pohjoista kohden (Aaltonen *ym.*, 2008).

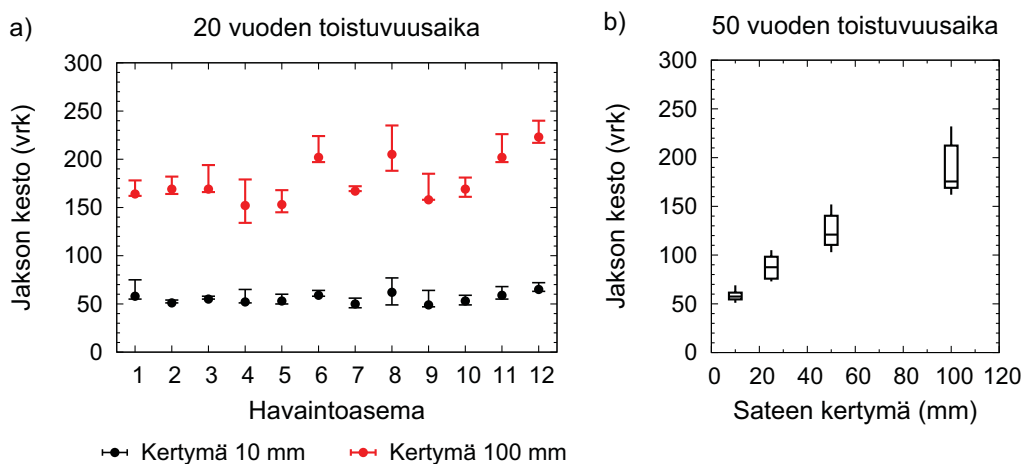
Kuukauden sademäärän toistuvuusajoja on tarkasteltu myös yhdistäen kaikkiaan yli 200 sademittausaseman tiedot. Näiden mukaan kerran 20 vuodessa sataa jossakin päin Suomea yli 260 mm kuukaudessa, mikä on paljon enemmän kuin kuvan 6 arvot. Ero selittyy sillä, että ilmiön osumisen todennäköisyys johonkin tiettyyn paikkaan on luonnollisesti pienempi kuin se, että ilmiö sattuu ylipäätään jossakin Suomessa. Toisaalta tarkasteltaessa aluesadantoja voidaan todeta, että niiden toistuvuustasot ovat pienempiä kuin havaintoasemien sademäärille lasketut. Esimerkiksi Länsi-Suomen sisämaahan sijoittuvan alueen (60,75–62,75°N, 22,75–25,25°E) vuorokautinen aluesadanta, joka on arvioitu hilapisteikköön saatetuista vuosien 1961–2007 havainnoista (luku 2.1), ylittää keskimäärin kerran 20 vuodessa arvon 35 (30–43) mm. Tämä on vain runsas puolet kuvassa 6 esitetyistä arvoista.

Sademittareita on nykyään keskimäärin vain yksi noin 500 neliökilometriä kohti, joten jossakin sademittarien välissä voi sataa reilusti enemmänkin kuin mitä tulee mitattua. Toinen sademittareiden heikkous on tilastollisten havaintoaineistojen niukkuus alle vuorokauden rankkasateista, sillä sademittari luetaan yleensä vain kerran vuorokaudessa. Helsingin Kaisaniemen piirtävän sademittarin viiden minuutin aineistoja ovat tarkastelleet Kilpeläinen *et al.* (2008).

Säätutkien tarjoamaa mahdollisuutta laajentaa sademittareiden antamaa kuvaa 15–60 minuutin sademääristä on puolestaan hyödynnetty RATU-hankkeessa (Aaltonen *ym.*, 2008). Tutkahavaintoaineistoista lasketut sateen intensiteetin toistuvuustasot olivat varsin samansuuruisia kuin sademittarihavainnoista aiemmin lasketut, mutta koska nyt mittauspisteitä oli tavattoman paljon enemmän, arvioita saatiin myös tietyllä paikalla äärimmäisen poikkeuksellisten sadetahtumien todennäköisyyksistä.

4.1.3 Vähäsateiset jaksot

Vähäsateisuutta koskevien tulosten mukaan pisin mihin tahansa vuodenaikaan osuva jakso, jonka kuluessa sataa yhteensä vain 10 mm, ylittää pituudeltaan 50–65 vrk keskimäärin kerran 20 vuodessa (kuva 7). Kesällä sataa enemmän kuin talvella, joten kesäajalle (touko–elokuu) laskettujen kuivuusjaksojen toistuvuustasot ovat selvästi lyhyempiä kuin koko vuodelle, esimerkiksi 20 vuoden toistuvuustaso on 40–50 vrk. Jakson pituuden vaihtelu paikasta toiseen on enintään 10 mm:n sadekertymälle varsin pientä, mutta kun nostetaan kuivuusrajana käytettävää jakson sadekertymää, alueellinen vaihtelu kasvaa samalla kun jaksot luonnollisesti pitelevät. Niinpä 25 mm:n kertymän 20 vuoden toistuvuustaso yhdellä asemalla voi olla melkein yhtä suuri kuin jollakin toisella asemalla 50 mm:n kertymän 20-vuotistaso. Toisin kuin runsaiden kahden viikon ja kuukauden sateiden tapauksessa, selvää eroa Etelä- ja Pohjois-Suomen välillä ei kuitenkaan nyt voida havaita.



Kuva 7: (a) 20 vuoden toistuvuusaikaa vastaavien sellaisten jaksoiden pituus, joiden aikana kertyy yhteensä vain 10 mm (mustalla) tai 100 mm:n (punaisella) sadekertymä. (b) 50 vuoden toistuvuusaikaa vastaavat kuivuusjaksojen pituudet, kun sadekertymän rajana on 10, 25, 50 tai 100 mm. Merkinnot: katso kuvaa 6.

4.2 Lämpötilan ja sademäärän tulevien muutosten maantieteellinen jakauma

Ilmaston lämpenemisen jakautumista maapallon eri alueille osataan nykyään arvioida entistä luotettavammin (*IPCC, 2007*). Koska ennustetun lämpenemisen maantieteellinen jakauma on kaikissa SRES-skenaarioissa (liite 5) varsin samanlainen eikä juurikaan muutu vuosisadan edetessä, aloitamme ilmastonmuutosskenaarioiden tarkastelun kuvista 8 ja 9. Nämä esittävät maailmanlaajuisten ilmastomallien tulosten keskiarvoa vastaavaa lämpötilan nousua ja sademäärän prosentuaalista muutosta Euroopassa ja Pohjois-Atlantilla jaksoon 2070–2099 mennessä verrattuna vuosien 1971–2000 keskiarvoon. Ennusteet perustuvat A1B-skenaarioon, joka vastaa voimakkuudeltaan keskitasoista ilmastonmuutosta. Muutoskartat piirrettiin myös A2- ja B1-skenaariolle (nähtävillä hankkeen verkkosivustolta). Kaikissa skenaarioissa muutosten maantieteellinen jakauma oli pitkälti samanlainen kuin nyt esitetyissä kuvissa, mutta B1-skenaariota vastaavat muutokset ovat heikompia, A2-skenaariota vastaavat taas voimakkampia.

Useimmat ilmastomallit heikentävät Pohjois-Atlantin pohjois-eteläsuuntaista kiertoliikettä. Sen tähden Islannin eteläpuoleisilla merialueilla lämpötilan nousu jää vähäiseksi, kun lämpimän merivirran heikentyminen ja yleinen ilmaston lämpeneminen pitkälti kumoavat toisensa (kuva 8). Näillä alueilla lämpötilan nousua hidastaa myös meriveden voimakas sekoittuminen, joka jakaa lisääntyvän lämpöenergian paksuun vesikerrokseen. Pohjois-Atlantin kiertoliikkeen täydellinen pysähtyminen ainakaan tämän vuosisadan aikana näyttää varsin epätodennäköistä. Erityisesti on syytä korostaa, että lämpimän merivirran heikkenemisestä huolimatta lämpötila Pohjois-Euroopassa nousee selvästi.

Pohjoisella Jäämerellä on tulevaisuudessa nykyistä vähemmän jäätä, mikä näkyy talvisten lämpötilojen voimakkaana kohoamisena. Etelä-Euroopassa taas kesälämpötilat nousevat voimakkaasti, mikä ainakin osaksi johtuu maaperän kuivumisesta.

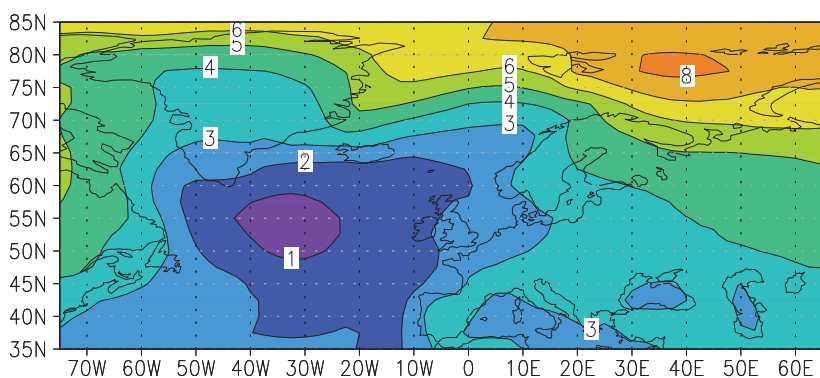
Sademäärien muutoksia (kuva 9) tarkasteltaessa huomataan, että tulevaisuudessa Pohjois-Euroopassa näyttäisi satavan nykyistä enemmän, etelässä taas vähemmän. Keski-Euroopassa sateet vähenevät kesällä mutta lisääntyvät talvella. Välimeren maissa sademäärien putoaminen on huolestuttavan suurta. A1B-skenaariota toteutuessa vuotuinen sademäärä vähenee joillakin alueilla 20%:n verran. Kesällä suhteellinen pudotus on vieläkin jyrkempi, jopa yli 30%.

Pohjois-Euroopassa sademäärä näyttää kasvavan kesälläkin noin 10%. Tämä ei kuitenkaan välttämättä merkitse kuivuuden tuottamien ongelmien katoamisesta, mahdollisesti päin vastoin. Lämmentyneessä ilmastossa nimittäin myös veden tarve lisääntyy haihdunnan voimistuksen vuoksi. On myös viitteitä siitä, että sateita saataisiin tulevaisuudessa nykyistä epäsäännöllisemmin (luku 4.11).

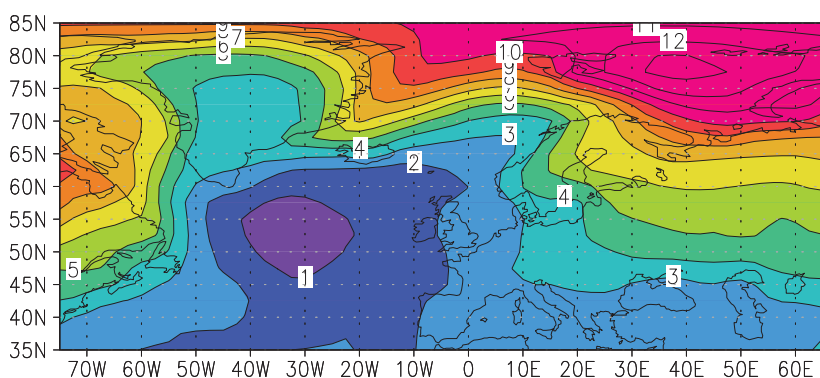
Täällä Suomessa lämpötila nousee ja sademäärä lisääntyy ilmeisesti jonkin verran nopeammin maan pohjois- kuin eteläosissa (kuvat 8–9). Maantieteellistä eroa suurempi on kuitenkin ero kesän ja talven välillä. Vaikka lämpenemistä ja sateiden runsastumista on odotettavissa kaikkina vuodenaikoina, muutokset ovat talvella selvästi kesää suurempia.

LÄMPÖTILAN MUUTOS (2070–99)–(1971–2000) A1B–SKENAARIO, 19 MALLIN KESKIARVO

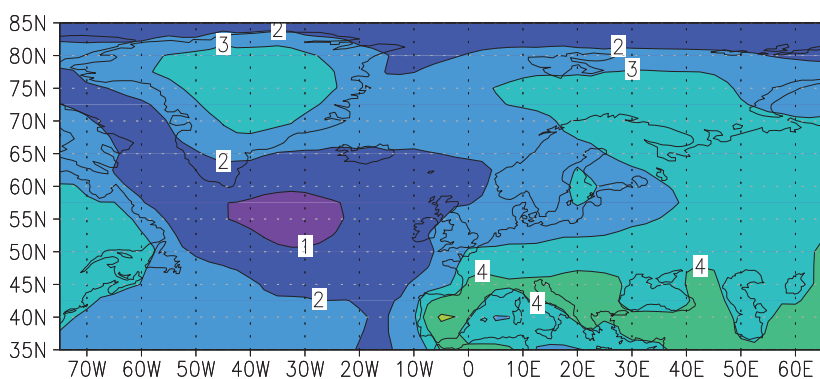
VUOSIKESKIARVO



TALVI

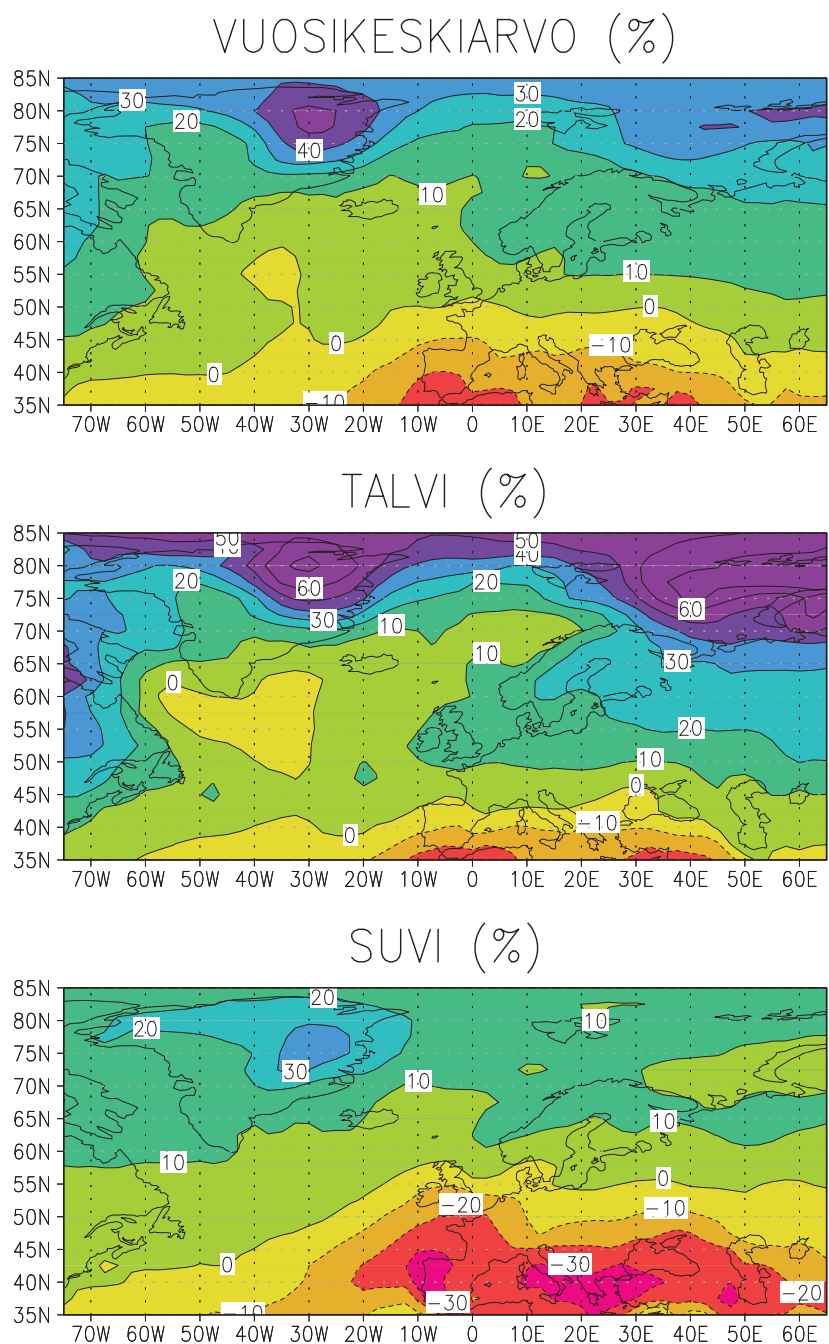


SUVI



Kuva 8: Lämpötilan ennustettu nousu (1971–2000 → 2070–2099) koko vuoden aikana keskimäärin (yläkuva), jouluihelmikuussa (keskimääräinen kuva) ja kesä-elokuussa (alakuva) Euroopan ja Pohjois-Atlantin alueella. Muutokset on laskettu 19 maapallonlaajuisen ilmastomuutosmallin A1B-skenaarioajojen keskiarvona. Yksikkö °C.

**SADEMÄÄRÄN MUUTOS (2070–99)–(1971–2000)
A1B–SKENAARIO, 19 MALLIN KESKIAARVO**



Kuva 9: Sademäärän ennustettu muutos (1971–2000 → 2070–2099) koko vuoden aikana keskimäärin (yläkuva), joulukuussa (keskimääräinen kuva) ja kesä-elokuussa (alakuva) prosentteina ilmaistuna. Muutokset on laskettu 19 maailmanlaajuisen ilmastomuutosmallin A1B-skenaarioajojen keskiarvona.

4.3 Lämpeneekö jo lähivuosisikymmeninä?

Tulevaa ilmastoa ei voida ennustaa tarkasti. Vaikka käytössä olisikin ilmastomalli, joka reagoi ilmakehän kasvihuonekaasujen lisääntymiseen täsmälleen oikein, epävarmuutta aiheutuu kuitenkin ilmaston luonnollisesta vaihtelusta. Emme tiedä, tuleeko tämä luonnollinen vaihtelu voimistamaan vai hidastamaan lämpenemistä lähivuosisikymmeninä.¹¹

Ilmastomallien ennustama, kasvihuoneilmaston voimistumiseen liittyvä lämpeneminen on kuitenkin lämpötilan luonnolliseen vaihteluun verrattuna varsin voimakasta. Siksi on hyvin todennäköistä, vaikkei aivan varmaa, että jo ensi vuosikymmenen (2011–2020) keskilämpötila on Suomessa vertailukauden 1971–2000 keskilämpötilaa korkeampi.

Taulukossa 1 esitellään laatimamme todennäköisyysennuste keskilämpötilan muutokselle. Muutos tarkoittaa tässä lämpötilaeroa 10-vuotisjakson 2011–2020 ja 30-vuotisjakson 1971–2000 välillä. Ennuste on laadittu erikseen Etelä-Suomea ja Pohjois-Suomea edustaville hila-pisteille, luvussa 3.3 ja liitteessä 6 kuvattua A-menetelmää käyttäen.

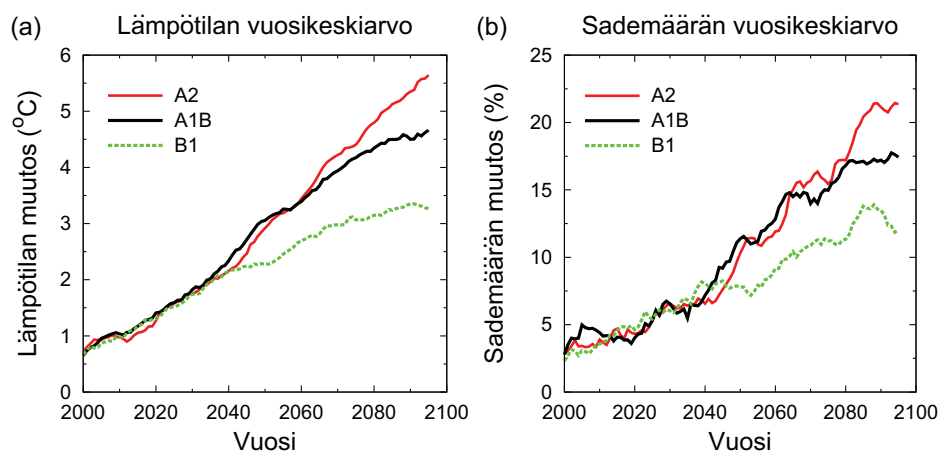
Taulukko 1: Todennäköisyysennusteita lämpötilan muutokselle (vuosisikymmenen 2011–2020 keskilämpötilan ero jaksoon 1971–2000 verrattuna). Parhaan arvion lisäksi on annettu epävarmuusväli, johon muutoksen voidaan odottaa osuvan 90%:n todennäköisyydellä. Suure $p(\Delta T > 0)$ kuvaa todennäköisyyttä, että tuleva keskilämpötila ylittää jakson 1971–2000 keskiarvon. (Vastaavat todennäköisyysennusteet kolmelle seuraavalle vuosikymmenelle on esitetty liitteessä A9.)

	Etelä-Suomi (60°N, 25°E)			Pohjois-Suomi (67.5°N, 27.5°E)		
	Paras arvio	Epävarmuusväli (5–95%)	$p(\Delta T > 0)$	Paras arvio	Epävarmuusväli (5–95%)	$p(\Delta T > 0)$
2011–2020						
Talvi (joulu–helmi)	1.3°C	-0.4 ...3.0	91%	1.6°C	-0.1 ...3.7	94%
Kevät (maalis–touko)	0.9°C	-0.2 ...1.9	90%	1.1°C	-0.2 ...2.1	91%
Kesä (kesä–elo)	0.6°C	-0.3 ...1.6	90%	0.7°C	-0.1 ...1.9	92%
Syksy (syys–marras)	0.8°C	-0.1 ...1.8	92%	1.1°C	0.0 ...2.1	95%
Vuosikeskiarvo	0.9°C	0.0...1.8	96%	1.1°C	0.1 ...2.2	97%

Paras arvio eli lasketun todennäköisyysjakauman mediaani on koko vuoden keskilämpötilan muutokselle noin 1°C, siten että lämpeneminen olisi talvella suunnilleen kaksinkertainen kesään nähden ja Pohjois-Suomessa hitusen voimakkaampaa kuin etelässä (taulukko 1). Lämpötilan muutokset keväällä ja syksyllä olisivat lähellä vuosikeskiarvoa eli kesä- ja talviarvojen välimaastossa.

Lämpötilan muutosten suuruus voidaan siis ennustaa vain karkeasti. Koko vuoden yli laskettu keskilämpötilan muutos näyttää kuitenkin asettuvan 90%:n todennäköisyydellä suunnilleen välille 0–2°C. Talvikeskilämpötilojen muutoksen epävarmuushaarukka on selvästi leveämpi kuin vastaavat haarukka keväälle, kesälle ja syksylle. Tämä johtuu siitä, että lämpötilat vaihtelevat vuodesta ja vuosikymmenestä toiseen enemmän talvella kuin muina vuodenaikoina.

¹¹Mainittakoon, että auringon aktiivisuus vaihtelee noin 11-vuotisten auringonpilkkujen esiintymisjaksojen tahdissa. Aurinko säteilee hieman enemmän pilkkujen esiintymisen maksimiaikoina kuin silloin, kun pilkkuja on niukasti. Ero huippukauden ja pohjalukemien välillä säteilyn voimakkuudessa on noin 0,1 prosenttia, josta aiheutuva muutos maapallon keskilämpötilassa on noin 0,1 °C. Auringon vaikutus maapallon keskilämpötilan muutokseen on siis vähäinen ihmisten aiheuttamaan ilmastomuutokseen verrattuna. Lisää asiasta on verkkosivuilla www.fmi.fi/ilmastonmuutos/maailma_17.html ja www.fmi.fi/uutiset/index.html?A=1&Id=1239007562.html.



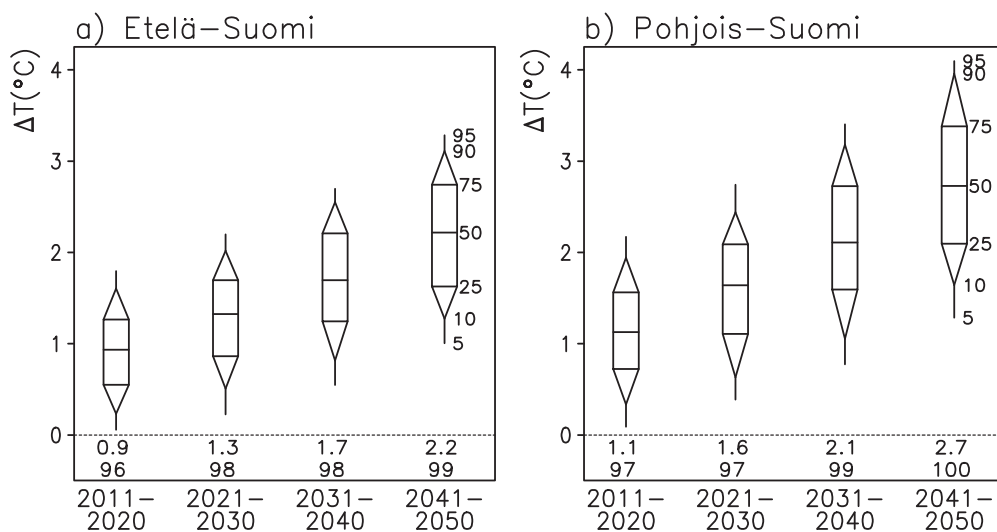
Kuva 10: (a) Vuotuisen keskilämpötilan kohoaminen ja (b) sademäärän kasvu vuosina 2000–2100 verrattuna perusjakson 1971–2000 keskiarvoon; koko Suomelle laskettuja 11 vuoden liukuvia aluekeskiarvoja. Nämä 19 maailmanlaajuisen ilmastomallin tulosten keskiarvoina saadut ennusteet on esitetty erikseen kolmelle eri kasvihuonekaasuskenaariolle, joista on enemmän asiaa liitteessä 5.

Todennäköisyydeksi, että koko vuosikymmenen 2011–2020 keskilämpötila ylittää vuosien 1971–2000 keskiarvon, saadaan hiukan yli 95%. Vastaava todennäköisyys yksittäisten vuodenaikojen keskilämpötiloille erikseen on jonkin verran alempi. Periaatteessa voi hyvin käydä niin, että joko talvet, kevät, kesät tai syksyt jäävät ensi vuosikymmenellä keskimäärin nykyistä vertailuarvoa viileämmiksi, mutta koko vuoden keskilämpötila nousee silti.

Ensi vuosikymmenen jälkeen kasvihuoneilmaston voimistuminen nostaa lämpötiloja edelleen. Tämä nähdään kuvista 10a ja 11. Edellinen kuva esittää mallien keskiarvona saatua Suomen keskilämpötilan kohoamista tämän vuosisadan kuluessa kolmelle eri kasvihuonekaasujen pitoisuusskenaariolle, kun luonnollista vaihtelua on tasoitettu pois. Jälkimmäisessä kuvassa luonnollinen vaihtelu on mukana. Molempien kuvien mukaan paras arvio vuosikeskilämpötilan nousulle Suomessa vuosisadan alkupuolella on 0,4–0,5°C vuosikymmentä kohti.

Vuosisadan puoliväliä lähestyttäessä käy jo hyvin epätodennäköiseksi, että kokonaisen vuosikymmenen keskilämpötila jäisi nykyisen keskiarvon alapuolelle (kuva 11 ja liite 9)). Ajan myötä kuitenkin myös lämpenemisen suuruutta kuvaavat todennäköisyysjakaumat levenevät eli kvantitatiivinen epävarmuus lisääntyy. Syynä tähän on ilmastomallien eroihin liittyvä epävarmuus, joka kasvaa vähitellen yhä suuremmaksi. Vuosisadan puoliväliä lähestyttäessä myös eri kasvihuonekaasuskenaarioita vastaavat käyrät alkavat jo hiukan erota toisistaan (kuva 10a). Tämä kasvattaa todellisen kokonaisepävarmuuden hieman suuremmaksi kuin mitä kuvasta 11 nähdään (kuvan laskelmissahan on käytetty vain A1B-skenaarioon perustuvia malliajoja). Todennäköisyysennusteita ilmaston muuttumisesta vuosisadan puolivälistä eteenpäin onkin syytä tarkastella esikseen (luku 4.5).

Tässä esitellyt tulokset kuvaavat vuodenaikais- ja vuosikeskilämpötilojen vuosikymmenkeskiarvojen muutosta. Lämpötilat vaihtelevat kuitenkin vuodesta toiseen. Todennäköisesti lähi-vuosikymmenille osuu siis mukaan vielä joitain perusjakson 1971–2000 mittauksien mukaan keskimääräistä viileämpiä vuosia, vaikka vuosikymmenet kokonaisuudessaan olisivatkin tuota 30-vuotijaksoa lämpimämpiä.



Kuva 11: Todennäköisyyssennuste keskimääräisen vuosikeskilämpötilan muutoksille (a) Etelä-Suomessa (60°N , 25°E) ja (b) Pohjois-Suomessa (67.5°N , 27.5°E) vuosikymmenittäin vuoteen 2050 asti. Luvut kuvaavat lämpötilaeroa jakson 1971–2000 keskiarvoon. Pylväät näyttävät kullekin vuosikymmenelle lasketun jakauman 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90% ja 95%:n pisteet. Lisäksi kunkin pylvään alla annetaan lukuarvoina paras arvio lämpenemiselle (yksikkö $^{\circ}\text{C}$) sekä prosentuaalinen todennäköisyys, että lämpötilan muutos on positiivinen.

4.4 Ovatko jo ensi vuosikymmenet sateisempia kuin mihin on totuttu?

Vaikka kasvihuoneilmion voimistuminen näyttäisikin mallitulosten mukaan kasvattavan sademäärää Suomessa, tämä muutos on kuitenkin melko hidasku (kuvat 10b ja 12). Vielä lähivuosikymmeninä se voi hyvin hukkuu ilmaston luonnollisen vaihtelun sekaan.

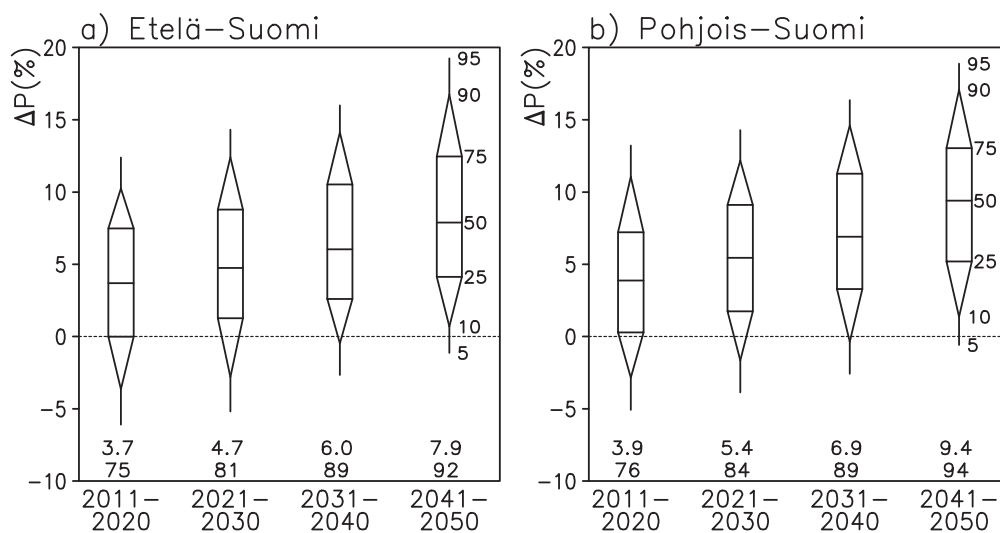
Taulukossa 2 esitellään todennäköisyyssennuste sille, miten vuosikymmenen 2011–2020 keskimääräiset sademäärät eroavat jakson 1971–2000 keskiarvosta. Paras arvio koko vuoden sademäärän kasvulle on noin 4%, siten että muutos olisi jonkin verran suurempi talvella kuin muina vuodenaikoina. Sademäärien suuren luonnollisen vaihtelun takia näyttäisi kuitenkin olevan vielä noin yhden neljäsosan mahdollisuus, että ensi vuosikymmenen vuotuinen keskisademäärä jäisi kasvihuoneilmion voimistumisesta huolimatta tähänastista keskiarvoa alemmaksi.

Kun tarkastellaan koko vuoden sateiden sijasta sademääriä vuodenaikaistasona, luonnollinen ilmastovaihtelu levittää epävarmuushaarukat vieläkin laajemmiksi. Siksi esimerkiksi todennäköisyys talvisateiden kasvulle on pienempi kuin todennäköisyys koko vuoden sademäärän kasvulle, vaikka sademäärä keskimäärin lisääntyykin malleissa eniten talvella. Kesän keskisademäärä kasvaa vain runsaan 60% todennäköisyydellä.

Kasvihuoneilmion vähitellen voimistuessa sen vaikutus Suomen sademääriin tulee ajan myötä selvemmin esiin ilmaston luonnollisen vaihtelun seasta (kuvat 10b ja 12). Vuosikymmenen 2041–2050 vuosittainen keskisademäärä ylittää laskelmamme mukaan jakson 1971–2000 keskiarvon jo yli 90%:n todennäköisyydellä.

Taulukko 2: Todennäköisyysennusteita sademäärän muutokselle (vuosikymmenen 2011–2020 keskiarvon ero perusjaksoon 1971–2000 verrattuna). Parhaan arvioon lisäksi on annettu epävarmuusväli, johon muutoksen voidaan odottaa osuvan 90%:n todennäköisyydellä. Suure $p(\Delta P > 0)$ kuvaa todennäköisyyttä, että keskimääräinen sademäärä ylittää jakson 1971–2000 keskiarvon. (Vastaavat todennäköisyydenennusteet kolmelle seuraavalle vuosikymmenelle ovat liitteessä 9.)

2011–2020	Etelä-Suomi (60°N, 25°E)			Pohjois-Suomi (67.5°N, 27.5°E)		
	Paras arvio	Epävarmuusväli (5–95%)	$p(\Delta P > 0)$	Paras arvio	Epävarmuusväli (5–95%)	$p(\Delta P > 0)$
Talvi (joulu–helmi)	5%	-10...22	69%	6%	-8...23	73%
Kevät (maalis–touko)	3%	-13...22	63%	3%	-12...22	63%
Kesä (kesä–elo)	3%	-15...21	62%	3%	-11...17	63%
Syksy (syys–marras)	3%	-16...20	63%	4%	-10...18	69%
Vuosikeskiarvo	4%	-6...12	75%	4%	-5...13	76%



Kuva 12: Todennäköisyysennuste keskimääräisen vuosisademäärän muutoksille (a) Etelä-Suomessa (60°N, 25°E) ja (b) Pohjois-Suomessa (67.5°N, 27.5°E) vuosikymmenittäin vuoteen 2050 asti. Luvut kuvaavat prosentuaalista eroa jakson 1971–2000 keskisademäärään. Pylväät esittävät kullekin vuosikymmenelle lasketun jakauman 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90% ja 95%:n pisteet. Lisäksi kunkin pylvään alla annetaan lukuarvoina paras arvio sademäärän muutokselle (yksikkö %) sekä prosentuaalinen todennäköisyys, että muutos on positiivinen.

4.5 Kuinka tarkkaan pystytään arvioimaan vuosisadan jälkipuoliskon ilmastoa?

Vuosisatamme puolivälin tienoilla ja siitä eteenpäin ilmastomuutoksen arvioitu voimakkuus vaihtelee jo selvästi eri kasvihuonekaasuskenaarioiden välillä (kuva 10). Skenaariosta riippuen vuoden keskilämpötilan ennustetaan nousevan tällä vuosisadalla 3–6°C ja sademäärän lisääntyvän 12–22%. Pohjois-Suomessa lämpötila nousee ja sademäärä lisääntyy ilmeisesti jonkin verran nopeammin, maan eteläosissa hieman hitaammin (kuvat 8–9). Annetut luvut vastaavat eri mallien tulosten keskiarvoa, ja todellisuudessa mallien keskinäiset erot leventävät vielä epävarmuushaarukkaa.

Tämän epävarmuushaarukan levenemisen takia eri päästöskenaarioita vastaavien muutosarvioiden epävarmuusvälit osuvat osittain päällekkäin. Yhden mallin simuloima ilmasto voi olla niin herkkä ilmakehän koostumuksen melko hitaillekin muutoksille, että sen ennakoima ilmastomuutosvaste on yhtä suuri tai suurempikin kuin toisen, vähemmän herkän mallin simuloima muutos voimakkaammalla kasvihuonekaasuskenaariolla.

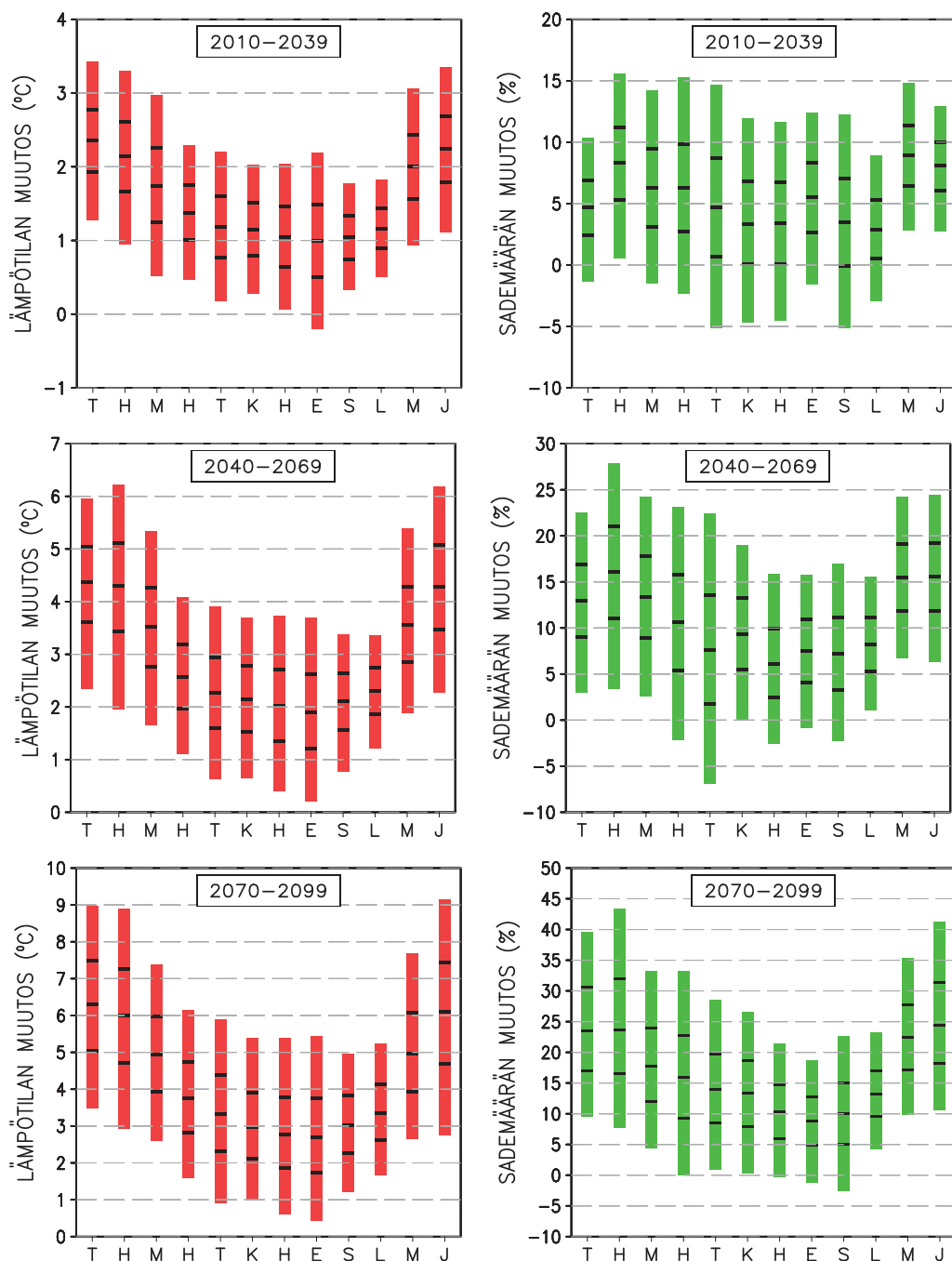
Niinpä on löydettävissä muutosarvoja, jotka ovat mahdollisia kaikkien kolmen päästöskenaariion (A1B, A2 ja B1) perusteella, ja toisaalta arvoja, joihin päädytään vain suurilla/pienillä kasvihuonekaasujen päästöillä ja/tai herkkyydeltään ääripäitä edustavien mallien avulla. Kysymystä siitä, kuinka tarkkaan pystytään arvioimaan vuosisadan jälkipuoliskon ilmastoa, käsittelemme lähtien tästä ajatuksesta, joka on luvussa 3.3 kuvatun B-menetelmän taustalla.

Muutosarviota laadittaessa otetaan siis huomioon samalla kertaa sekä eri mallien tulosten että kasvihuonekaasuskenaarioiden erilaisuus (liite 8). Kuvassa 13 on esitetty näin ennustettuja lämpötilan ja sademäärän muutoksia epävarmuusasteineen eri kuukausina.¹² Vuosisadan puoliväliä ja loppua kuvaavien 30-vuotisjaksojen ohella tiedot on annettu myös jaksolle 2010–2039, vaikka tämän jakson aikana kasvihuonekaasuskenaarioiden ero onkin vielä pieni. Kaikki muutokset ovat koko Suomen keskiarvoja. Tiedot ovat saatavilla numeromuodossa hankkeen verkkosivustolla, vuodenajoittain lasketut muutokset myös liitteessä 10.

Jos esimerkiksi halutaan saada selville paras arvio eli muutoksen mediaaniarvo jakson 2040–2069 toukokuulle, etsitään tätä jaksoa vastaavista kuvista 50. prosenttipiste. Siitä voidaan nähdä, että lämpötila nousee tuolloin todennäköisimmin 2,3°C ja sademäärän lisääntyy 8%. Vastaavasti kuva kertoo, että lämpötilan nousu osuu 90%:n todennäköisyydellä 0,6°C (5. prosenttipiste) ja 3,9°C (95. prosenttipiste) välille.

Sekä lämpeneminen että sademäärien lisääntyminen on talvella selvästi voimakkaampaa kuin kesällä. Vuosisadan loppuvuosikymmeninä lämpötila nousee talvella todennäköisimmin noin 6°C, kesällä hiukan alle 3°C (kuva 13, vasemman alareunan kaavio). Mallitulosten perusteella on kuitenkin myös mahdollista, että lämpötila nousee talvisin jopa yhdeksällä, kesälläkin viidellä asteella – näitäkin lukemia voimakkaamman lämpenemisen todennäköisyys on 5%. Toisaalta pienimmillään lämpeneminen voi tuossa vaiheessa jäädä kesällä alle yhteen, talvella noin kolmeen asteeseen. Kuitenkin on käytännössä varmaa, että lämpötila nousee kesäkuukausinakin ainakin jonkin verran.

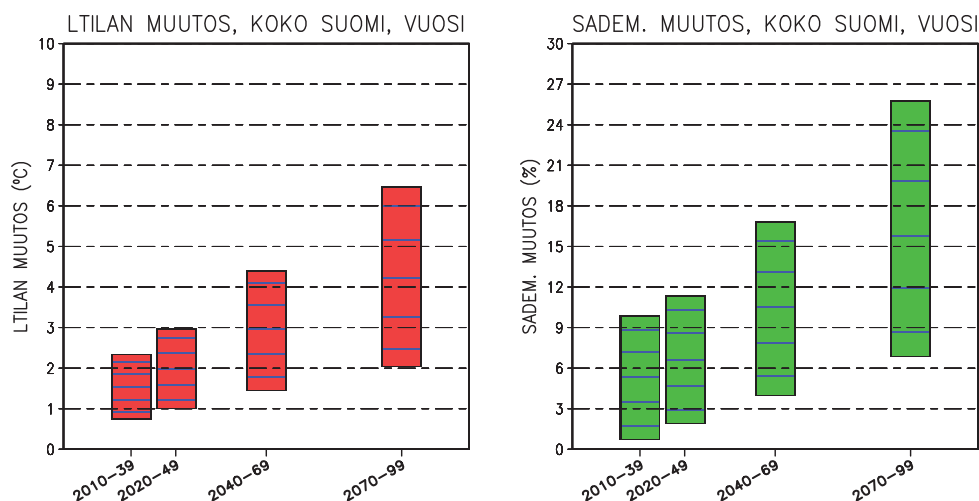
¹²Sivustolla www.fmi.fi/acclim on esitetty todennäköisyysjakaumat erikseen myös eri kasvihuonekaasuskenaarioita vastaaville muutoksille. Näitä tarvitaan esimerkiksi tutkiskeltaessa päästörajoitusten vaikutuksia.



Kuva 13: Todennäköisyysjakauman prosenttipisteitä Suomen keskilämpötilan (vasemmanpuoleiset kuvat) ja sademäärän (oikeanpuoleiset kuvat) muutokselle. Ylimmät kuvat esittävät jaksoa 2010–2039, keskimmäiset jaksoa 2040–2069 ja alimmat jaksoa 2070–2099, kaikissa vertailukohtana jakso 1971–2000. Muutoskenaariot perustuvat 19 maailmanlaajuisen ilmastomallin tuloksiin, ja niitä laadittaessa A1B-, A2- ja B1-kasvihuonekaasuskenaariot on kaikki oletettu yhtä todennäköisiksi. Pylvään alara ja vastaa 5. ja yläpää 95. prosenttipistettä. Mustin poikkiviivoin on esitetty 25%, 50% (mediaani) ja 75%:n pisteet. Muutokset on annettu jokaiselle kuukaudelle (T=tammikuu, H=helmikuu, jne.). Prosenttipisteet on “yhteismitallistettu” vastaamaan vuodenaikaisennusteiden epävarmuutta. Lämpötilan muutoksen yksikkö on °C, sademäärän %.

Jo lähivuosisikymmeninä lämpötilan voidaan odottaa nousevan kesällä noin asteen, talvella runsaat kaksi astetta (kuvan 13 kaavio vasemmalla ylhäällä). Ylimmissä arvioissa lämpeneminen on asteen verran näitä lukemia voimakkaampaa, alimmissa suunnilleen saman verran heikompaa. Kesäkuukausina on täten vielä tuolloin mahdollista, ettei lämpötila nousisi juuri lainkaan.

Sademäärän muutosten ennustaminen on vaikeampaa kuin lämpötilan. Parhaan arvion mukaan sateet kuitenkin lisääntyvät kaikkina vuodenaikoina, talvella enemmän kuin kesällä. Vuosisadan lopulla talvikuukausina sataisi reilut parikymmentä prosenttia perusjakson aikaista enemmän, epävarmuushaarukka n. 10–40%. Kesällä sateiden lisäys on kymmenen prosentin luokkaa; epävarmuushaarukan alareunassa sademäärät säilyisivät lähes nykyisellään, yläreunassa lisääntyisivät noin 20%. Jakson 2010–2039 muutokset ovat heikompia, ja useimpina kuukausina sademäärän pieni putoaminenkin näyttää vielä mahdolliselta.



Kuva 14: Suomen alueen vuotuisen keskilämpötilan ja sademäärän muuttuminen verrattuna perusjaksoon 1971–2000. Muutokset on annettu neljälle 30-vuotisjaksolle, kullekin paras arvio (50% piste) sekä kuusi muuta todennäköisyysjakauman prosenttipistettä (5., 10., 25., 75., 90. ja 95.). Muutoskenaariot perustuvat 19 maailmanlaajuisen ilmastomallin tuloksiin, ja niitä laadittaessa A1B-, A2- ja B1-kasvihuonekaasuskenaariot on kukin oletettu yhtä todennäköisiksi.

Yksittäisten kuukausien ja vuodenaikojen ohella todennäköisyysjakaumat on laskettu myös koko vuoden keskilämpötilan ja sademäärän muutokselle (kuva 14 ja liite 10). Esimerkiksi vuosisatamme kolmen viimeisen vuosikymmenen aikana vuoden keskilämpötila olisi Suomessa keskimäärin reilut neljä astetta (epävarmuushaarukka 2,0°C–6,5°C) ja sademäärä noin 16% (7–26%) korkeampi kuin jaksona 1971–2000.

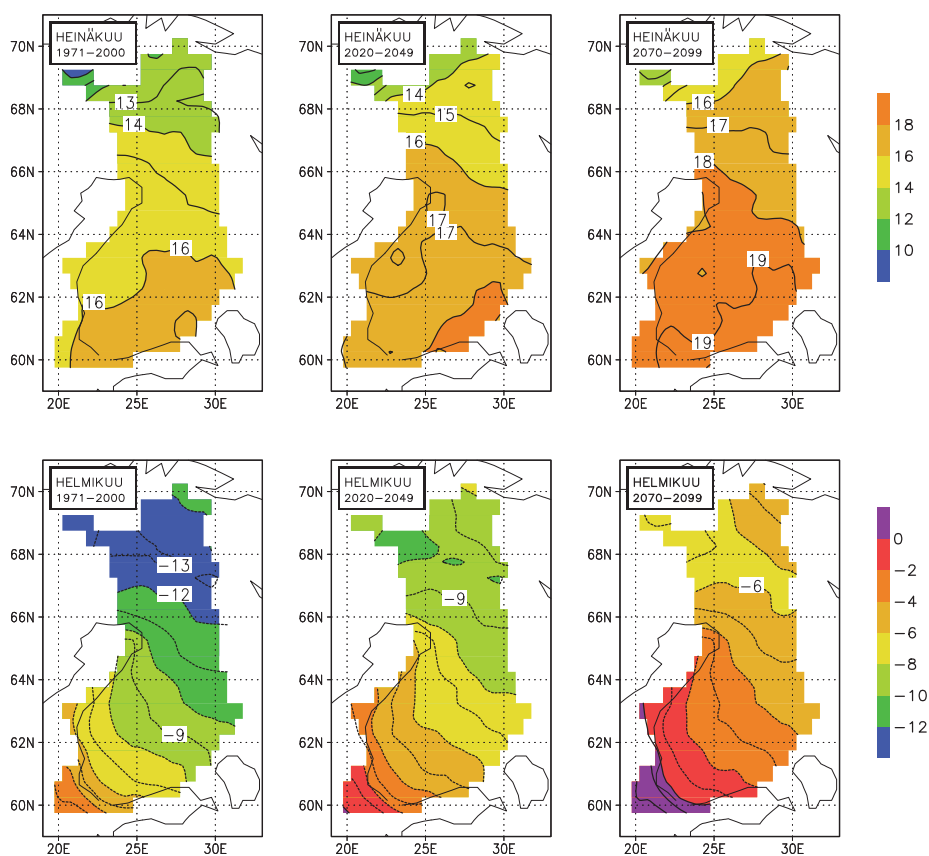
Kuten kappaleessa 3.3 kerrottiin, kuukausittaiset muutosennusteet on yhteismitallistettu vuodenaikaisennusteiden kanssa siten, että kuukausitasolla annetut epävarmuushaarukat ovat sopusoinnussa vuodenaajoille esitettyjen tulosten kanssa. Koko vuoden keskiarvoja ennustettaessa näin ei ole voitu tehdä, vaan näissä tuloksissa hajonta on luonnostaan jonkin verran pienempää.

Todettakoon vielä, että tässä annetut lämpötilaennusteet eivät poikkea kovinkaan paljon aiemmista, suppeampaan ja osaksi vanhempaan ilmastomalliaineistoon perustuvista arvioista

(Ruosteenoja et al., 2005). Jaksolle 2070–99 poikkeamat ovat toukokuuta lukuunottamatta enintään puolisen astetta. Uudet sademääräennusteet taas ovat useimpina vuoden kuukausina jonkin verran aiempia ennusteita “mämpiä”. Ero on huomattavin loppukesällä. Edellisten mallitulosten perusteella esimerkiksi elokuun sademäärän ei pitäisi muuttua juuri lainkaan, kun taas uudet mallit povaavat keskimäärin lähes 10% sademäärän lisäystä vuosisadan loppuun mennessä (kuva 13).

4.6 Siirtyvätkö Turun talvet Jyväskylään vai Rovaniemelle?

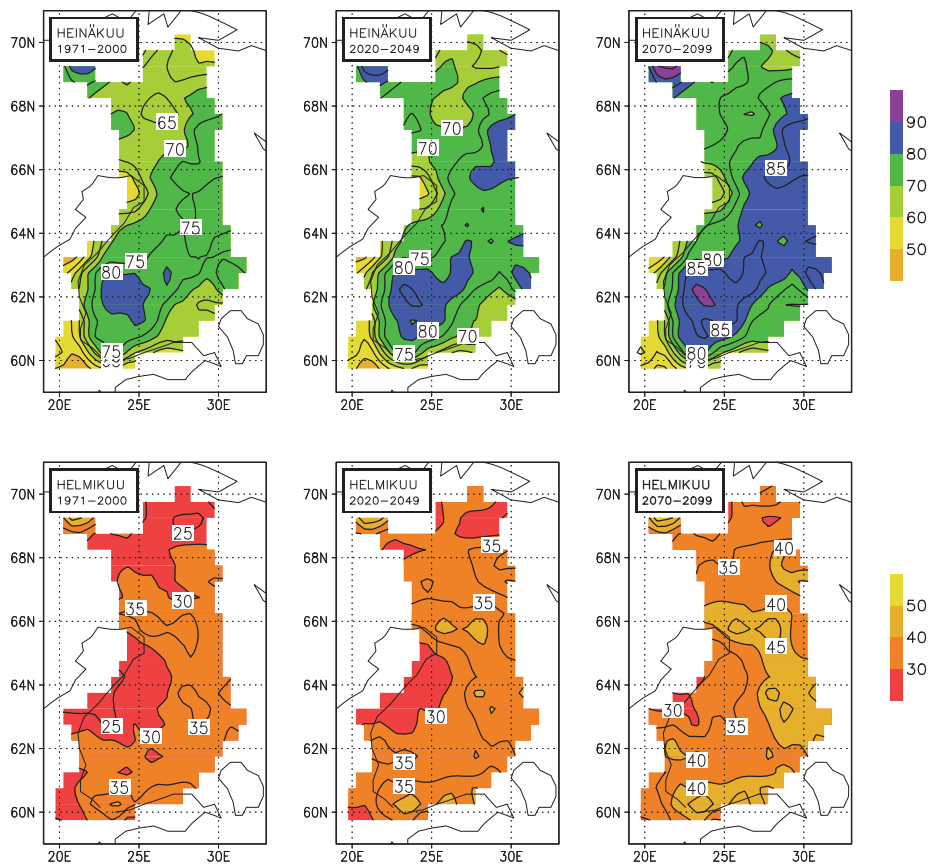
Mallitietoihin perustuva paras arvio tulevista keskikesän ja -talven lämpötiloista on esitetty kuvassa 15, vastaava arvio sademäärälle kuvassa 16. Tämän vuosisadan lopulla Lapin ilmasto näyttäisi lämpöoloiltaan muistuttavan perusjakson aikaista Etelä-Suomea. Esimerkiksi heinäkuun kartassa 17 celsiusasteen käyrä, joka perusjakson aikana oleili Suomen kaakkoiskulmassa, on kiivenyt Keski-Lappiin. Helmikuussa Lapin keskilämpötilat leudontuvat 5–7 pakkas-



Kuva 15: Heinäkuun (yläkuvat) ja helmikuun (alakuvat) keskilämpötilat (°C) Suomessa vv. 1971–2000 (vasemmanpuoleiset kartat), 2020–2049 (keskisarake) ja 2070–2099 (oikea sarake). Perusjakson 1971–2000 keskilämpötilat on laskettu havainnoista, myöhemmät lämpötilat on saatu lisäämällä havaittuihin keskilämpötiloihin mallien ennustama “todennäköisin” lämpötilan muutos (olettamalla toisaalta A1B-, A2- ja B1-kasvihuonekaasuskenaariot keskenään yhtä todennäköisiksi, toisaalta antamalla sama paino kaikille 19 ilmastonmuutosmallille).

asteeseen, jollaisia lämpötiloja perusjakson aikana tavataan Lounais-Suomen sisämaassa. Perusjakson aikana lounaisrannikolla vallinneet helmikuun lämpötilat ovat jo ennen vuosisadan puoliväliä siirtyneet Keski-Suomeen. Sieltä Jyväskylän tienoilta Turun nykyiset talvet siirtyivät siis Rovaniemen seudulle vuosisadan lopulle tultaessa.

Ilmaston lämmitessä sekä keskitalven että keskikesän sademäärä lisääntyy suurimmassa osassa Suomea 5–10 mm/kk, heinäkuussa saaristossa hieman vähemmän (kuva 16). Kuitenkin kvantitatiivisesti sateiden maantieteellinen jakauma säilyy nykyisenkaltaisena, eli muuta maata kuivemmat ja sateisemmat alueet pysyvät entisillä paikoillaan. Myös sateiden vuotuinen kulku säilyy entisen kaltaisena: vaikka sademäärän prosentuaaliset muutokset ovat talvella isompia kuin kesällä, sademäärät ovat edelleen kesällä talvea suurempia.

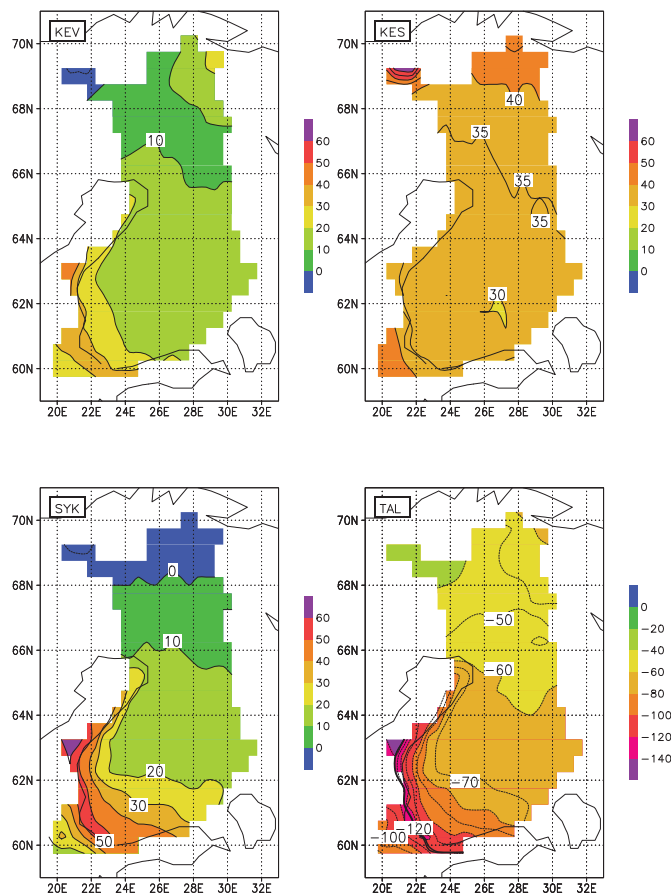


Kuva 16: Heinäkuun (yläkuvat) ja helmikuun (alakuvat) sademäärä (mm/kk) Suomessa vv. 1971–2000 (vasemmanpuoleiset kartat), 2020–2049 (keskisarake) ja 2070–2099 (oikea sarake). Perusjakson 1971–2000 sademäärät perustuvat suoraan havaintoihin, myöhemmät sademäärät on saatu kertomalla havaitut arvot mallien ennustamalla “todennäköisimmällä” tulevan ja nykyisen sademäärän suhteella. (ks. kuvan 15 selitystekstiä).

4.7 Säilyvätkö neljä vuodenaikaa — miten kasvukausi muuttuu?

Suomessa määritellään termiseksi kesäksi se osa vuotta, jolloin vuorokauden keskilämpötila on korkeampi kuin $+10^{\circ}\text{C}$. Vastaavasti termisen talven aikana vuorokauden keskilämpötila jää pakkasen puolelle. Näiden väliin sijoittuvat terminen kevät ja syksy. Termiseen kasvukauteen taas kuuluvat ne päivät, joina keskilämpötila ylittää $+5^{\circ}\text{C}$ rajan. Kasvukauden lämpösumma saadaan laskettua vähentämällä jokaisena kasvukauden päivänä vuorokauden keskilämpötilasta 5°C ja laskemalla näin saadut lämpötilajäännökset yhteen.

Ilmaston lämmitessä terminen talvi lyhenee voimakkaasti, muut vuodenajat taas pitenevät, poikkeuksena tästä kevät ja syksy Pohjois-Lapissa. Mikäli kuvan 8 mukainen, nykyisten arvioiden mukaan voimakkuudeltaan “keskitasoinen” ilmaston lämpeneminen toteutuu, terminen talvi lyhenee Lounais-Suomessa vuosisadan viimeiseen kolmannekseen mennessä yli neljällä kuukaudella (kuva 17). Läntisiltä ja lounaisilta saaristoalueilta terminen talvi häviäisi vähitellen kokonaan.



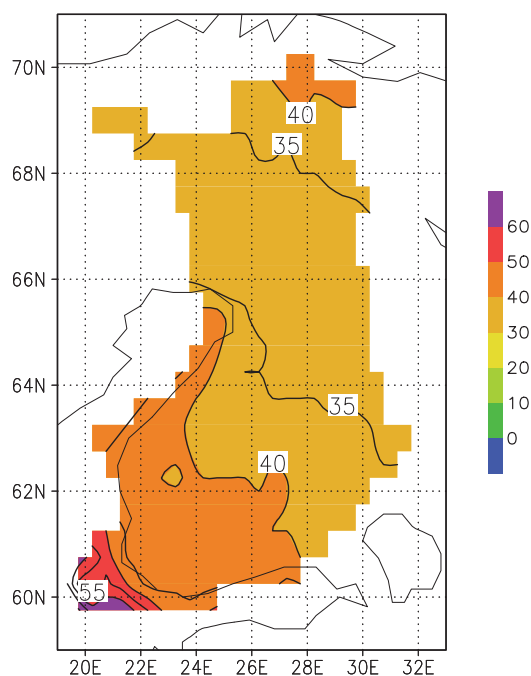
Kuva 17: Termisten vuodenaikojen pituuksien muuttuminen siirryttäessä jaksosta 1971–2000 jaksoon 2070–2099, kun oletetaan lämpötilojen nousevan A1B-skenaarion mukaisesti (19 maailmanlaajuisen mallin keskiarvo): KEV = kevät, KES = kesä, SYK = syksy ja TAL = talvi. Samanarvonkäyrien väli on 10 vrk, paitsi kesää esittävässä kuvassa 5 vrk. Huomaa talvikuvan väriasteikon erilaisuus. Talven pituuden muutosta esittävään kuvaan piirretyn paksun mustan viivan länsipuolella ei tässä skenaariossa termistä talvea ole vuosisadan lopulla enää lainkaan.

Etelässä, missä vuodenaikojen pituudet muuttuvat eniten, terminen talvi korvautuu suureksi osaksi syksyllä, joka kestää enimmillään noin kaksi kuukautta entistä pitempään. Termisen talven alku siirtyy näin huomattavasti myöhäisemmäksi. Mantereisemmän ilmaston alueella Keski- ja Pohjois-Suomessa muutokset ovat vähäisempiä.

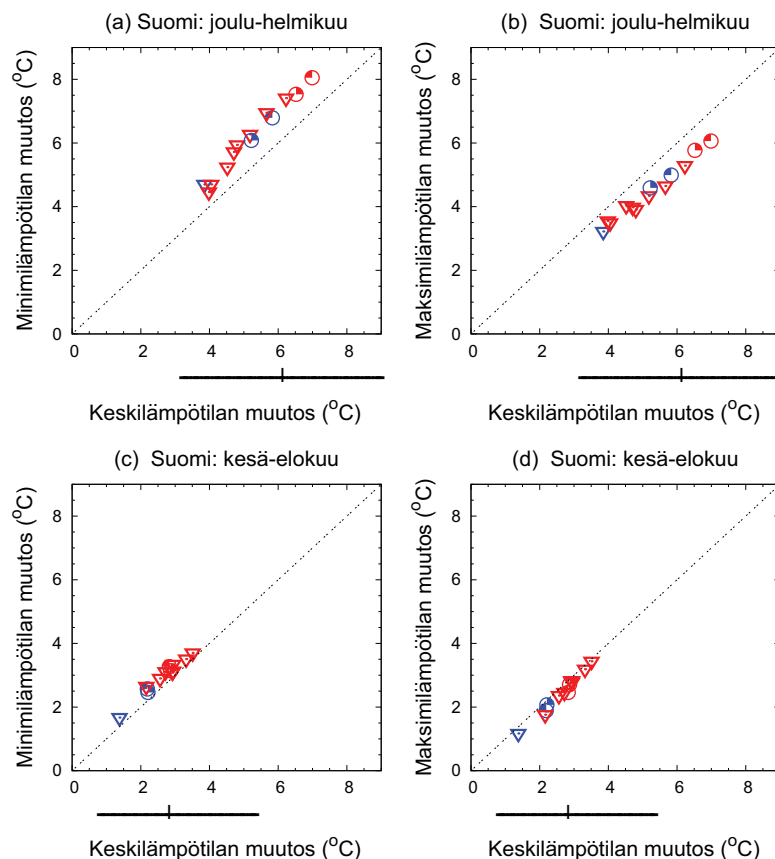
Myös terminen kevät pitenee eniten rannikkoalueilla, ei kuitenkaan niin paljon kuin syksy. Kesä pitenee lähes kaikkialla 1–1,5 kk, Lapin käsivarressa jopa kahdella kuukaudella. Samalla pitenee myös terminen kasvukausi, A1B-skenaarion toteutuessa manner-Suomessa 1–1,5 kk, lounaissaaristossa vieläkin enemmän (kuva 18). Huomattakoon kuitenkin, että varsinkin lounaassa iso osa pidennyksestä ajoittuu myöhäissyksyyn, jolloin valon vähyys rajoittaa kasvien kasvua.

Termisten vuodenaikojen ja kasvukauden pituuksien ja alkamisajankohtien muutokset laskettiin myös A2- ja B1-skenaarioille (*Ruosteenoja ym., 2009*). Odotetusti muutokset olivat sitä suurempia, mitä voimakkaampaa ilmastomuutoskenaariota tarkasteltiin.

Ilmaston lämmitessä myös kasvukauden lämpösummat kasvavat selvästi (*Ruosteenoja ym., 2009*). Mikäli kasvihuonekaasujen päästöt ovat runsaita (A2-skenaario), vuosisadan lopulla lämpösumma olisi Keski-Lapissa samaa luokkaa kuin nykyisin Etelä-Suomessa (1200 °Cvrk). Pohjanmaan tuleva lämpösumma (n. 1600 °Cvrk) vastaisi nykyistä Tanskaa, Etelä-Suomen sisämaan 1900 °Cvrk nykyistä Belgiaa. B1-skenaarion toteutuessa lämpösumma kasvaisi vähemmän, mutta tuolloinkin vuosisadan lopulla kertyisi Oulun tienoilla yhtä paljon lämpösummaa kuin nykyisin lounaissaaristossa.



Kuva 18: Kasvukauden ennustettu pidentyminen Suomessa siirryttäessä jaksosta 1971–2000 jaksoon 2070–2099, kun oletetaan lämpötilojen nousevan A1B-skenaarion mukaisesti (19 maailmanlaajuisen mallin keskiarvo).



Kuva 19: Vuorokauden alimpien (vasemmalla) ja ylimpien (oikealla) lämpötilojen keskimääräiset muutokset Suomessa talvella (yllä) ja kesällä (alla) jaksosta 1971–2000 jaksoon 2070–2099 verrattuna vastaavaan keskilämpötilan muutokseen. Diagonaalin alapuolella muutokset ovat pienempiä, yläpuolella suurempia kuin keskilämpötilan muutokset. Punaiset symbolit esittävät alueellisten ilmastomallikokeiden tuloksia A2-skenaariolle, siniset B2-skenaariolle. Enemmistö alueellisista malleista (alaspäin osoittavat pikkukolmiot) käytti reunaehtoinaan maapallonlaajuisen HadAM3H-mallin tuloksia. Muutama rinnakkaisajo tarkensi HadAMHP-mallia (ylöspäin osoittavan pikkukolmiot), muutama puolestaan ECHAM4/OPYC-mallia (ympyrät). Pistediagrammien alapuoliset janat esittävät maailmanlaajuisiin malleihin perustuvia keskilämpötilan muutoksen 90%:n todennäköisyysvälejä, ja kunkin janan pystypalkki ilmaisee parhaan arvion (liite 10).

4.8 Miten vuorokauden ylin ja alin lämpötila muuttuvat?

Vuosisadan viimeiseen kolmannekseen mennessä vuorokauden minimilämpötilojen keskiarvon arvioidaan kohoavan talvella keskimäärin noin $0,5\text{--}1,5^\circ\text{C}$ enemmän kuin keskilämpötilojen ja maksimilämpötilojen puolestaan $0,5\text{--}1,0^\circ\text{C}$ keskilämpötiloja vähemmän (kuvat 19a–b). Keväällä vuorokauden minimi-, maksimi- ja keskilämpötilan muutokset eroavat toisistaan suunnilleen saman verran kuin talvella, mutta kesällä (kuvat 19c–d) ja syksyllä erot ovat pieniä, vain muutamia kymmenesosa-asteita. Eri lämpötilasuureiden vuodenaikaiskeskiarvojen muutosten välillä on kuvan 19 mukaan talvella ja kesällä lähes lineaarinen yhteys. Yhteys on selvä myös syksyllä ja pitkälti keväälläkin.

Nämä ylimpien ja alimpien lämpötilojen muuttumista koskevat tulokset pohjautuvat alueellisiin ilmastomallikokeisiin. Koska minimi- ja maksimilämpötilojen muutokset ovat selvästi kytköksissä keskilämpötilan muutoksiin, herää kysymys, miten hyvin keskilämpötilan muutokset alueellisissa malliajoissa sopivat yhteen aiemmin esitettyjen, maailmanlaajuisiin CMIP3-malleihin perustuvien ilmastomuutoksen perusskenaarioiden kanssa. Tämän tarkastelemiseksi on kuvan 19 kunkin pistediagrammin vaaka-akselin alapuolelle piirretty jana, joka näyttää luvun 4.5 todennäköisyysennusteiden mukaisen keskilämpötilan muutoksen mediaanin sekä 5. ja 95. prosenttipisteet (lukuarvot liitteessä 10).

Nähdään, että kahden eri malliaineiston antamat keskilämpötilan muutokset sopivat hyvin yhteen. Alueellisten mallien mukaiset arviot ryhmittyvät nimittäin CMIP3-malleihin perustuvien ala- ja yläarvioiden väliin, suurin osa lähelle parasta arviota. Suppeampi alueellinen malliaineisto näyttää kuitenkin jonkin verran aliarvioivan muutoksen suuruuteen liittyvää epävarmuutta, varsinkin hyvin voimakkaan lämpenemisen mahdollisuutta.

Käyttämällä hyödyksi vuorokauden ääriämpötilojen ja keskilämpötilan muutosten lähes lineaarista yhteyttä voidaan arvioida, että talvien 2070–2099 keskilämpötilan muutosarviota 6,1 (3,1–9,0)°C (liite 10) vastaisi vuorokauden alimman lämpötilan nousu noin 7 (4–10) asteella ja ylimmän lämpötilan nousu runsaalla 5 (2–8) asteella. Nämä likimääräiset lukuarvot on tarkoitus päivittää ACCLIM II-hankkeessa CMIP3-mallien vuorokausiaineistojen avulla.

Edellä tarkasteltavina olivat keskimääräiset vuorokautiset ylimmät ja alimmat lämpötilat. Näiden lisäksi hankkeessa on tutkittu kesä- ja talvikuukausien ylimpien ja alimpien lämpötilojen jakaumien muuttumista, joskin vain yhden mallikokeen nojalla (RCA3-E5-A1B liitteen 3 taulukossa). Analysoitavina olivat vuosien 1971–2000 ja 2071–2100 kunkin kesä- ja talvikuukauden alimmat minimi- ja ylimmät maksimilämpötilat.

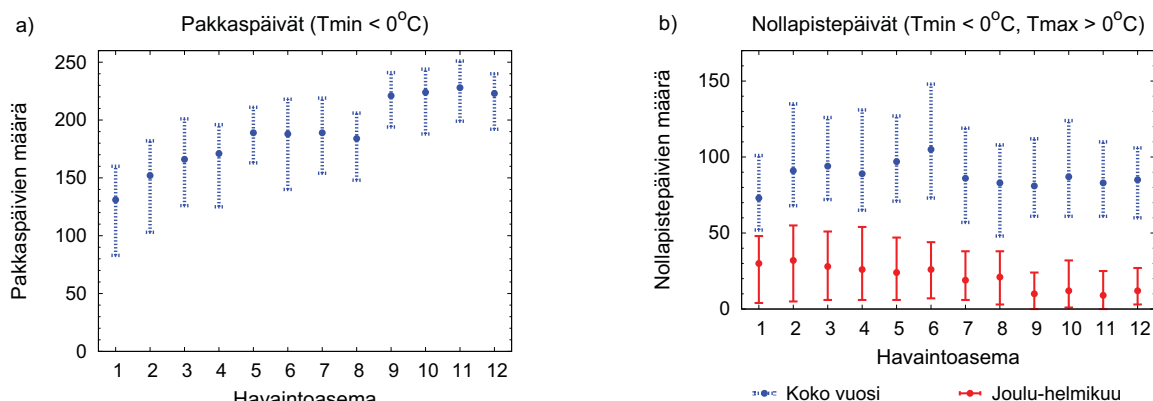
Kyseisessä mallikokeessa lämpötilasuureiden jakaumat siirtyivät ilmastomuutoksen myötä kokonaisuudessaan kohti korkeampia lämpötiloja. Kesäkuukausina ääriämpötilojen jakaumien muoto säilyi melko ennallaan. Toisin sanoen kesäkuukausien tavanomaiset alimmat ja ylimmät lämpötilat kohosivat suunnilleen saman verran kuin harvinaisemmat ääriämpötilat.

Talvella ääriämpötilojen muutoksen suuruus jakauman eri osissa ei ollut aivan yhtä tasaista kuin kesällä. Harvinaisen lauhat kuukauden ylimmät lämpötilat kohosivat enemmän kuin tavanomaiset tai kylmät kuukauden maksimilämpötilat. Eniten nousivat kuitenkin talvikuukausien alimmat minimilämpötilat.

4.9 Vieläkö tulevaisuudessa pakkanen paukkuu?

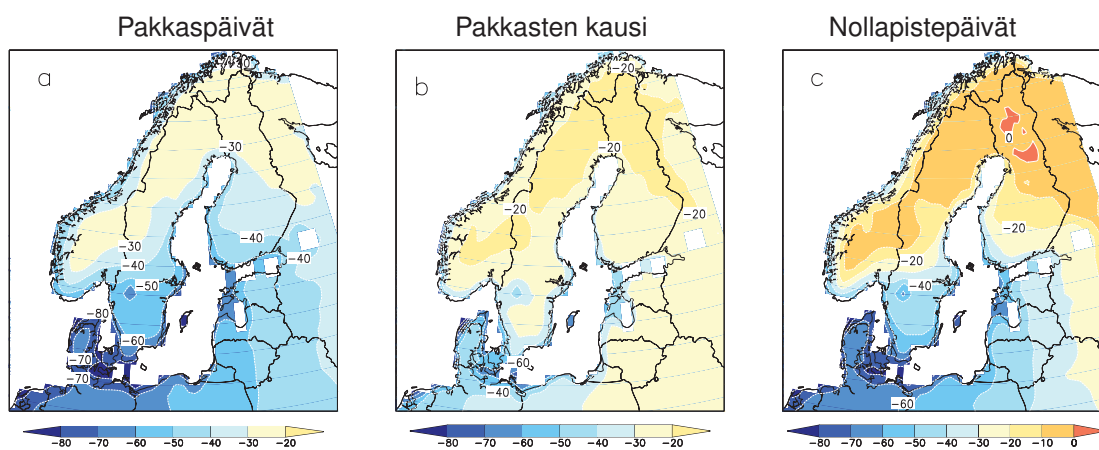
Ilmaston lämmitessä ja etenkin talven alimpien lämpötilojen kohotessa harvenevat sellaiset päivät, joina minimilämpötila jää pakkasen puolelle. Tällaisia pakkaspäiviä havaittiin jakson 1971–2000 aikana vuosittain esimerkiksi Helsingissä keskimäärin noin 130, Jokioisissa noin 165, Jyväskylässä noin 190 ja Sodankylässä noin 225 kpl¹³ vuotuisen vaihtelun ollessa toki

¹³ HadAM3H-mallia tarkentavien alueellisten ilmastomallien keskiarvoina saadut keskimääräiset vuotuiset pakkaspäivien lukumäärät jakson 1971–2000 aikana vastasivat havaintoja 10 vrk:n tarkkuudella; Helsingissä pakkaspäiviä simuloitiin hieman liian runsaasti, muualla hieman liian niukasti.



Kuva 20: (a) Vuotuinen pakkaspäivien määrä sekä (b) vuotuinen (sinisellä) ja jouluihelmikuun (punaisella) nollapistepäivien määrä havaintojen mukaan. Jakson 1971–2000 keskiarvon lisäksi on annettu jakson suurin ja pienin arvo. Havaintoasemat 1–12 etelästä kohti pohjoista on lueteltu liitteessä 1.

suurta (kuva 20a). Pakkaspäivät yleistyvät siis melko nopeasti rannikolta sisämaahan ja etelästä pohjoiseen mentäessä. Vuosisadan viimeiseen kolmannekseen siirryttäessä määrän arvioidaan putoavan Lapissa ja Kainuussa 50–60 päivällä ja muualla maassa 60–70 päivällä, rannikolla enemmänkin. Pakkaspäiviä olisi tuolloin Pohjois-Suomessa noin kolmannes ja etelässä noin puolet nykyistä vähemmän (kuva 21a). Suhteellisesti ottaen pakkaspäivät harvenevat siis eniten siellä, missä niitä on myös nykyisessä ilmastossa vähiten.



Kuva 21: (a) Vuotuisten pakkaspäivien määrän, (b) syksyn ensimmäisestä kevään viimeiseen pakka-keen ulottuvan jakson pituuden ja (c) nollapistepäivien määrän muutos (%) maa-alueilla siirryttäessä jaksosta 1961–1990 jaksoon 2071–2100. Kuva perustuu seitsemän alueellisen ilmastomallin tulosten keskiarvoon. Malleja ajettaessa reunaehdot on saatu HadAM3H-ilmastomallista, ja tuleville päästöille on käytetty A2-skenaariota.

Syksyn ensimmäinen pakkane viivästyy alueellisten ilmastomallikokeiden mukaan keskimäärin kolmesta neljään viikkoa, kevään viimeinen puolestaan aikaistuu lähes saman verran. Niinpä aikaväli ensimmäisestä viimeiseen pakkaspäivään lyhenee lähes kahdella kuukaudella, mikä on nykyiseen verrattuna Etelä- ja Keski-Suomessa 20–30 prosenttia, pohjoisessa hieman

vähemmän (kuva 21b). Samalla tämän pakkaskauden lomaan osuvat suojapäivät lisääntyvät. Tulokset ovat hyvin samansuuntaisia sen kanssa, että terminen kasvukausi pitenisi manner-Suomessa 1–1,5 kk, lounaisaariostossa vieläkin enemmän (kuva 18).

Lämpötila pyörii nolla-asteen molemmin puolin (vuorokauden alin lämpötila pakkasen ja ylin suojan puolella) nykyisin keskimäärin noin 80–100 päivänä vuodessa, joskin määrä vaihtelee kovasti vuodesta toiseen (kuva 20b). Koko vuoden mittaan tällaisia nollapistepäiviä on keskimäärin saman verran eri puolilla maata, mutta jouluhelmikuussa nämä helposti liukkautta ja loskakelejä aiheuttavat lämpötilaolot harvenevat pohjoista kohti, kuten nähdään kuvasta 20b. Lauhtumisen myötä talviset nollapistepäivät alkavat kuitenkin aluksi yleistyä koko maassa. Niinpä niitä on Itä- ja Pohjois-Suomessa vuosisadan viimeisenä kolmanneksena noin kaksinkertainen määrä nykyiseen verrattuna. Toisaalta tuohon mennessä lämpötilan arvioidaan kohonneen jo niin paljon, että nollapistepäiviä on nykyistä vähemmän talvella Lounais-Suomessa ja koko maassa keväällä ja syksyllä (*Jylhä et al., 2008*). Siten nollapistepäivien vuotuinen määrä on mallitulosten mukaan vuosisadan lopulla nykyistä suurempi enää vain paikoin maan pohjoisosissa (kuva 21c).

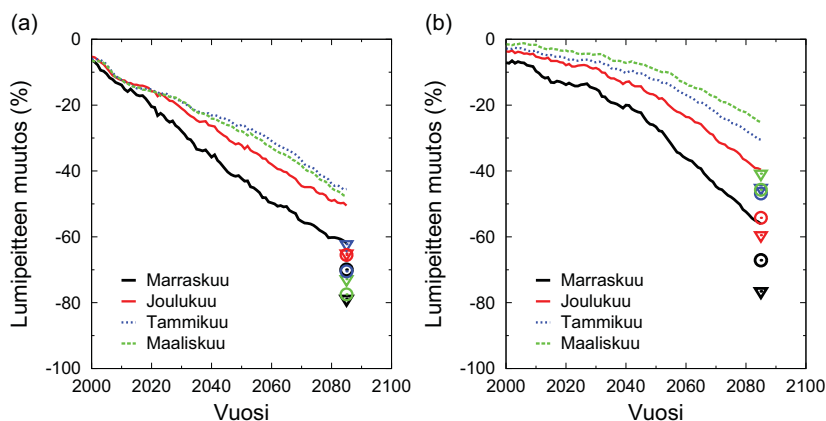
4.10 Miten käy lumipeitteen?

Havaintojen mukaan ensilumi sataa Etelä-Suomeen tavallisesti marraskuun puoliväliin mennessä, Lapin tunturien huipuille jo elo-syyskuussa. Pysyvä lumi peittää Pohjois-Suomen keskimäärin lokakuun loppupuolella, etelän vasta joululomien aikaan. Lounaisaariostossa lumipeitepäiviä on keskimäärin vajaa sata eli alle puolet siitä, mitä pohjoisessa¹⁴. Esimerkiksi Helsingin Kaisaniemessä oli v. 1961–1990 lunta maassa keskimäärin noin 115, Jokioisissa 150 ja Sodankylässä noin 210 päivänä vuodessa.¹⁵ Lumipeite on yleensä paksuimmillaan (eli Lounais-Suomessa 10–25 cm, Itä- ja Pohjois-Suomessa 50–75 cm) kevättalven aikaan maaliskuussa, Lapissa usein vasta huhtikuun alkupuolella. Varsin pian sen jälkeen alkaa nopea sulaminen. Lumikauden vaihtelu talvesta toiseen ja lähialueidenkin välillä on kuitenkin suurta (esim. *Solantien (2000, 2001)* kirjoitukset).

Lumisuuden tulevat muutokset heijastelevat sekä lämpötilan että sademäärän muutoksia. *Räisänen (2008)* on tarkastellut ilmastomallituloksia maailmanlaajuisesti ja todennut, että niiden mukaan lumen vesiarvo pienenee ilmaston lämmitessä alueilla, joilla marras-maaliskuun keskilämpötila on jo nykyään leudompi kuin -20°C (kuten kaikkialla Suomessa), ja suurenee kylmemmillä seuduilla. ACCLIM-hankkeessa Suomen lumipeitteen muutoksia on arvioitu sekä maapallonlaajuisten että alueellisten ilmastomallien tulosten avulla. Molempien aineistojen mukaan lumipeite kutistuu koko maassa, etelässä suhteellisesti ottaen enemmän kuin pohjoisessa, samoin loppusyksystä ja alkukevästä enemmän kuin keskitalvella (kuva 22). Keskimäärin ottaen lumi vähenee ajan mukana melko suoraviivaisesti, ja A2-skenaariossa muutokset ovat suurempia kuin B1-skenaariossa.

¹⁴Karttakuva lumipeitepäivien keskimääräisestä vuotuisesta lukumäärästä v. 1971–2000 on nähtävissä verkkosivulla www.fmi.fi/saa/tilastot_10.html ja keskimääräisestä lumensyvyyydestä 15. maaliskuuta sivulla www.fmi.fi/saa/tilastot_132.html

¹⁵HadAM3H- ja ECHAM4/OPYC-mallia tarkentavien alueellisten ilmastomallien keskiarvoina saadut keskimääräiset vuotuiset määrät olivat Jokioisissa ja Sodankylässä muutaman päivän tarkkuudella samat kuin havaitut, sen sijaan Helsingin lumipeitepäiviä mallit yliarvioivat.



Kuva 22: Lumipeitteen vesiarvon (mm) eli lumikuorman (kg/m^2) muutos (prosentteina) (a) Keski-Suomessa lähellä Jyväskylää (62.25°N , 25.75°E) ja (b) Lapissa lähellä Sodankylää (67.25°N , 26.25°E) marras-, joulu-, tammi- ja maaliskuussa A2-skenaarion toteutuessa. Käyrät esittävät 17 maailmanlaajuisen mallin tulosten 30 vuoden liukuvia keskiarvoja, ja erilliset symbolit näyttävät alueellisten mallien tulosten keskiarvot jaksolle 2070–2099 (kolmiot HadAM3H-reunaisille ja ympyrät ECHAM4/OPYC-reunaisille malleille). Vertailujakso on v. 1971–2000. (Helmikuun käyrät olivat lähellä maaliskuun ja huhtikuun käyrät lähellä joulukuun käyriä.)

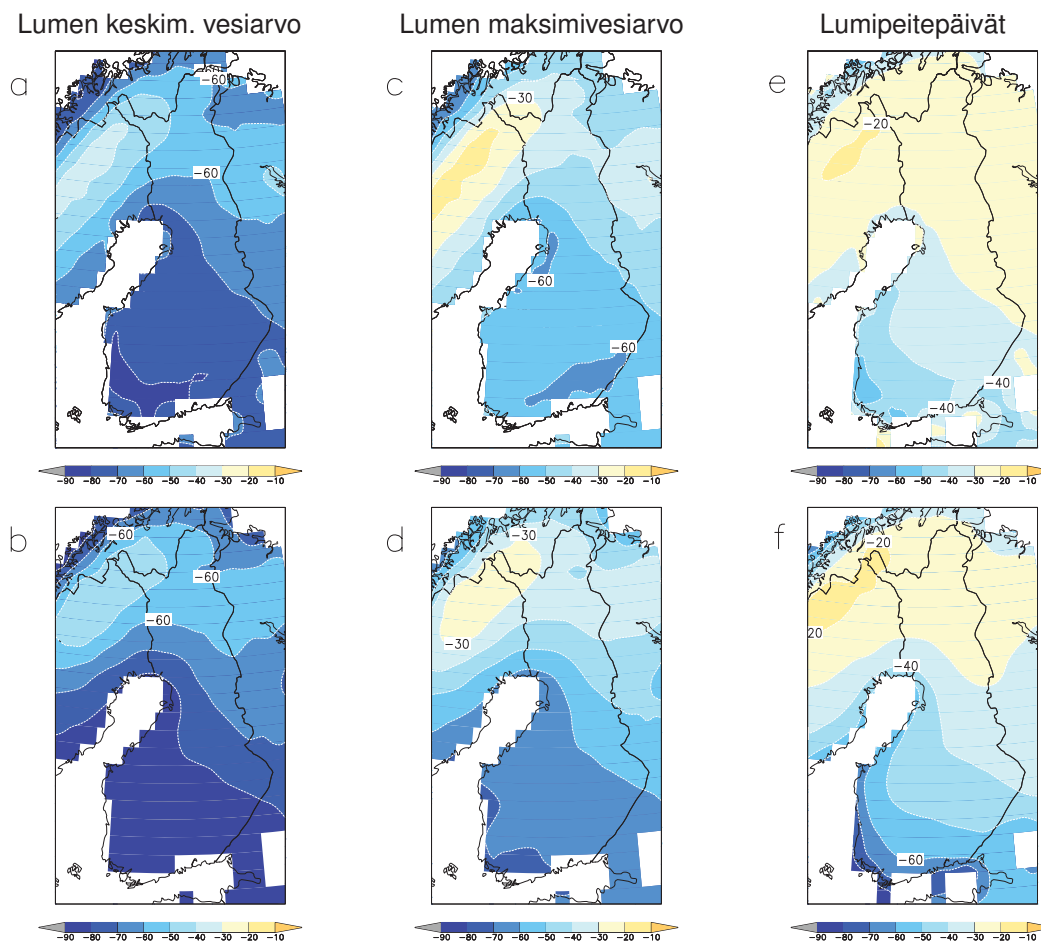
Mutta kuinka paljon lumipeite kutistuu, siitä eri mallit ja malliaineistot antavat jonkin verran toisistaan poikkeavia tuloksia. Lumen hupeneminen Suomessa on selvästi hitaampaa maailmanlaajuisissa kuin alueellisissa mallikokeissa. Kuvan 22 esimerkeissä Jyväskylälle ja Sodankylälle erot kahden mallityypin keskimääräisten muutosten välillä on vuosisadan lopulla noin 20 prosenttiyksikköä.

Lumipeitteen muutosten arvioiminen osoittautui itse asiassa varsin haasteelliseksi. Laskelmiin kelpuutettiin mukaan 17 maapallonlaajuista CMIP3-mallia (tarkemmin liitteessä 2), mutta vertailujakson aikainen lumipeitteen vesiarvo vaihteli suuresti niidenkin välillä. Myös alueellisissa mallikokeissa lumisuureiden yksiköt tuntuvat vaihtelevan,¹⁶ mikä kovasti hankaloittaa usean mallin muodostaman kokoelman hyödyntämistä esimerkiksi sen arviointiin, miten muuttuu sellaisten päivien määrä, joina lumen tietty vesiarvo tai syvyys ylittyy.

Useimpien maapallonlaajuisen mallien laskema Suomen nykyinen ilmasto on liian kylmä (Karppanen, 2006). Siten lämpötilan noususta huolimatta talvilämpötilat pysyttelevät näissä malliajoissa tulevaisuudessaakin enimmäkseen pakkasen puolella, mikä jarruttaa lumipeitteen vähenemistä.¹⁷ Niinpä on luultavaa, että enemmistö CMIP3-malleista aliarvioi lumipeitteen hupenemisvauhtia. Sitä vastoin tarkastelemisamme alueellisissa mallikokeissa Pohjois-Euroopan nykyinen talvi-ilmasto on tyypillisesti liian lämmin (Jacob et al., 2007), mikä voi viitata lumen muutosten yliarviointiin. Simuloitu pakkaspäivien määrä Suomessa on kuitenkin vain hieman liian pieni (luku 4.9), ja alueellisten mallien keskiarvona saatu lumipeitepäivien vuotuisen määrän jakauma Suomessa vertailujakson aikana vastaa varsin hyvin havaintoja.

¹⁶Tämän vuoksi useaan alueelliseen malliin perustuvat tulokset lumen vesiarvolle esitetään prosenttimuutosten keskiarvoina, ei mallikeskiarvojen prosenttimuutoksina, kuten esimerkiksi sadesuureille.

¹⁷Räisänen (2008) on kehittänyt menetelmää, jonka avulla lämpötilan systemaattisen virheen vaikutusta lumennusteisiin voidaan pienentää. Tätä sovelletaan ACCLIM II-hankkeessa.



Kuva 23: Lumen keskimääräisen vesi-arvon (vasen), vuoden suurimman lumen vesi-arvon (keskellä) ja vuotuisten lumipeitepäivien määrän (oikea) keskimääräinen muutos (%) maa-alueilla siirryttäessä jaksosta 1961–1990 jaksoon 2071–2100. Ylävirin karttakuvat perustuvat kuuden alueellisen ilmastomallin tulosten keskiarvoon; niitä ajettaessa reunaehdot on saatu HadAM3H-ilmastomallista. Alarivin kuvat perustuvat kolmen alueellisen mallin simulaatioon ECHAM4/OPYC-mallin reuna-arvoilla. Tuleville päästöille on käytetty A2-skenaariota. Väriasteikko on 10 %:n välein.

Voidaan lisäksi olettaa, että tarkemman alueellisen erotuskykynsä ansioista alueelliset mallit pystyvät kuvaamaan lumiolojen suurta paikallista vaihtelua paremmin kuin maailmanlaajuiset mallit. Vaikka nämä seikat vahvistavat luottamusta alueellisten mallien kokoelman tuloksiin lumelle, varsin mahdollista on, että tulevaisuudessa toteutuvat lumipeitteen muutokset sijoittuisivat globaalien ja alueellisten mallien mukaisten arvioiden väliin.

Pitäen tämän mielessä katsomme seuraavaksi alueellisten mallien tuloksia muutosten maantieteellisestä jakaumasta vuosisadan viimeisiin vuosikymmeniin mennessä. Kutakin karttakuvaa on kaksi eri versiota, sillä malliajoista on muodostettu kaksi ryhmää sen perusteella, minkä maapallonlaajuisen mallin tuloksia ne tarkentavat. Erot ryhmien keskiarvojen välillä ovat kuitenkin melko pieniä, enimmillään noin 10 prosenttiyksikköä.

Kuvien 23a-b mukaan lumen keskimääräinen vesi-arvo vähenee Etelä- ja Keski-Suomessa vuosisadan viimeiseen kolmannekseen mennessä 70–80%, jopa enemmän. Pohjois-Suomessakin

Käsivarren Lappia lukuunottamatta lumen määrä jää alle puoleen nykyisestä. Myös lumen vesiarvon vuotuinen maksimi pienenee (kuvat 23c–d), mutta ei prosentuaalisesti yhtä paljon kuin sen vuotuinen keskiarvo. Runsaslumisimpien päivien lumipeite ohenee Käsivarressa keskimäärin vajaa 30%, muualla Lapissa ja Kainuussa 30–50%.

Vuotuisten lumipeitepäivien arvioidaan vähenevän vuosisadan lopulle tultaessa Pohjois-Suomessa 20–30% (kuvat 23e–f). Etelää kohden mallien laskemat muutokset nopeutuvat, mutta päästäänkö Lounais-Suomessa 60 prosentin pienennykseen, siihen mallit antavat vaihtelevia vastauksia. Joka tapauksessa lumipeitteisten päivien määrä pienenee suhteellisesti vähemmän kuin lumen vesiarvon vuosikeskiarvo ja vuotuinen maksimi. Tämä tarkoittaa sitä, että vaikka lumi ei katoakaan kokonaan, entistä enemmän on vesiarvoltaan niukkalumisia päiviä. Kevään ja alkutalven aikana lumipeitepäivät harvenevat vielä enemmän kuin keskitalvella.

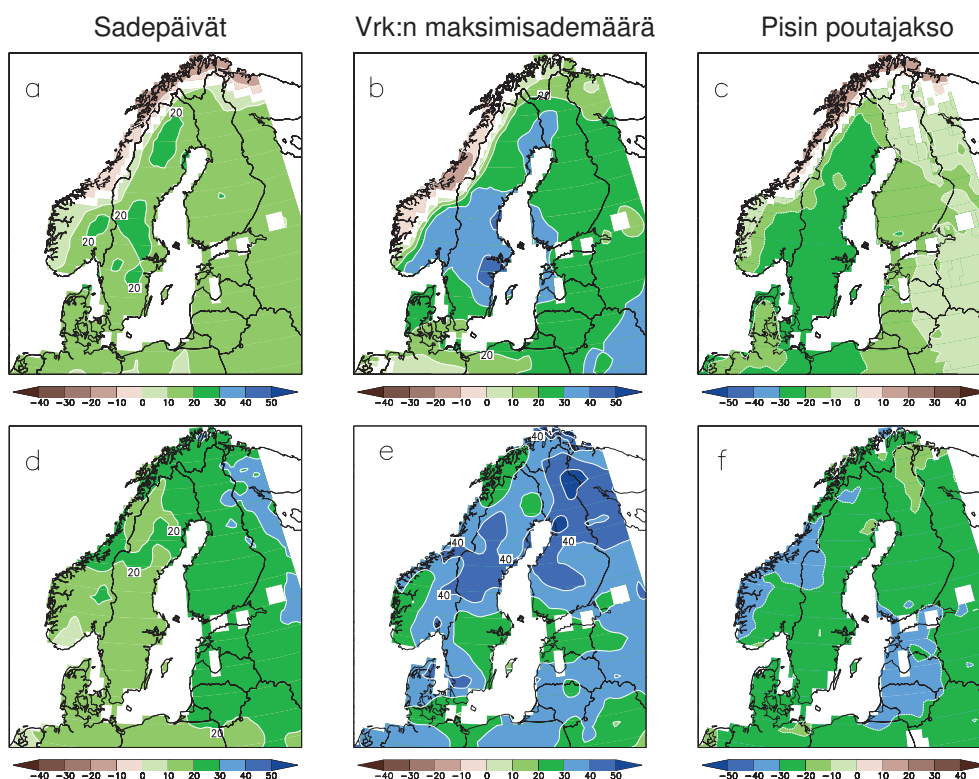
Kuvien 23a–b lumimäärän muutoskenaariot ovat varsin samansuuruisia kuin FINADAPT-hankkeessa raportoidut tulokset, jotka perustuvat vuosikymmenen alussa valmistuneisiin maapallonlaajuisiin ilmastomallikokeisiin (*Ruosteenoja et al., 2005*). Lumen vähenemisen ja lumipeiteajan lyhenemisen ohella myös lumipeitteen rakenne muuttuu. *Rasmuksen ym. (2004)* mukaan lumi on vuosisadan loppupuolella keskimäärin tiheämpää ja suurikiteisempää kuin nykytalvina. Hangen keskilämpötila on lähellä sulamispistettä myös keskitalvella. Tämä lisää talvenaikaisen sulamisen ja sulamisvesien valunnan todennäköisyyttä. Kuivan pakkaslumen osuus vähenee ja sulavan tai jäisen lumen osuus kasvaa merkittävästi ympäri Suomea. Niinpä jäisen lumen vyöhyke siirtyy pohjoisemmaksi. Toisaalta sekä lumen määrä että sen rakenne voivat vaihdella vuodesta toiseen enemmän kuin nykyisin.

4.11 Lisääntyvätkö sadepäivät vai pitenevätkö poutakaudet?

Suomessa sataa havaintojen mukaan noin joka toinen päivä vähintään 0.1 mm/vrk ja suunnilleen joka kolmas päivä vähintään 1 mm/vrk, joskaan ei tasaisesti pitkin vuotta. Kuten kuvasta 16 nähtiin, tyypillisesti vähäsateisimman kalenterikuukauden eli helmikuun kertymä on niin nykyään kuin arvioiden mukaan myös tulevaisuudessa vain noin puolet siitä, mitä sataa heinäkuussa. Heinä- ja elokuu ovat vuoden kuukausista sateisimmat. Kun vuodenajan suurin vuorokauden sademäärä on nykyään jouluihelmikuussa keskimäärin noin 15 mm/vrk, niin kesä-elokuussa se on keskimäärin noin 25–30 mm/vrk.

Talvisateiden runsastuminen tulevaisuudessa (kuva 13) aiheutuu kahden tekijän yhteisvaikutuksesta: sadepäivät yleistyvät ja yksittäisinä sadepäivinä saatavat sateet voimistuvat. Samalla talvien pisimmät sateettomat jaksot lyhenevät. Tämä nähdään kuvasta 24, joka esittää talven sadepäivien, suurimman vuorokausisateen ja pisimmän sateettoman jakson pituuden muutosten maantieteellisiä jakaumia useiden alueellisten mallien tulosten keskiarvoina. Kyseessä on kaksi eri malliajoryvästä, sillä ylärivin muutoskarttojen taustalla on eri maapallonlaajuinen reunaehtomalli kuin alarivillä. Talvisia sadepäiviä kuvaavien indeksien muutoksen suunnasta maassamme eri malliajot ovat hyvin yksimielisiä, vaikka muutoksen suuruus onkin vielä epävarma: kuvan 24 alarivin mukaan muutokset olisivat jonkin verran voimakkaampia kuin ylärivin mukaan.

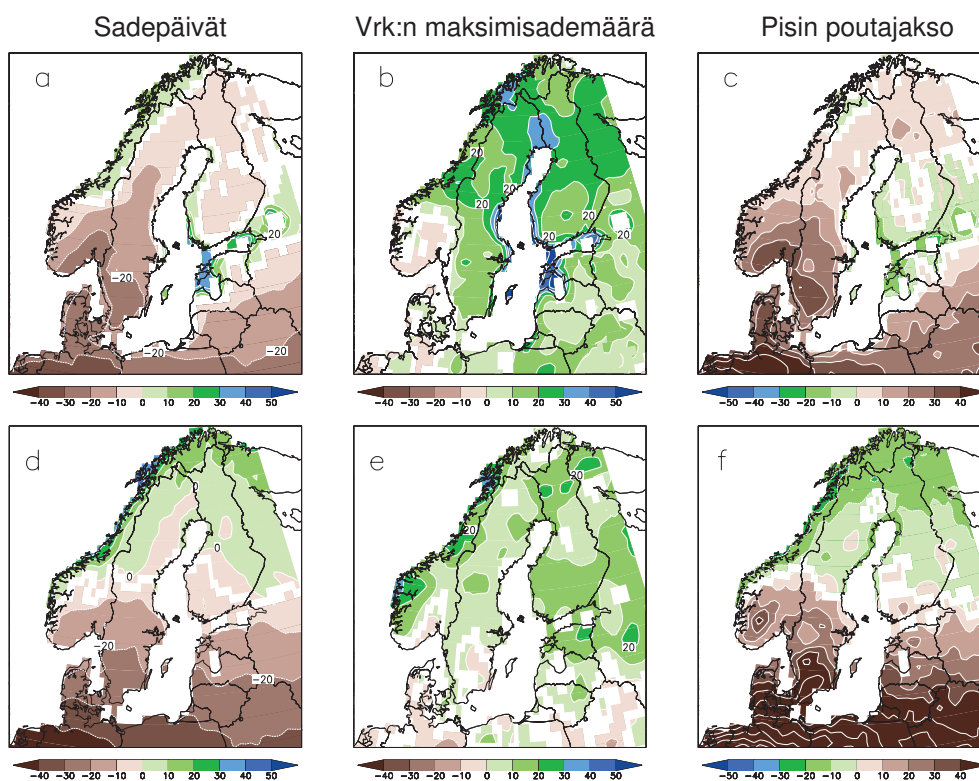
Mitä suurempia talven kokonaissademäärän kasvua mallit arvioivat, sitä enemmän (joskaan ei prosentteina yhtä paljon) muuttuvat myös sateiden vaihtelua kuvaavat indeksit. Useimpien



Kuva 24: Joulu-helmikuun sadepäivien (yli 1 mm sadetta) määrän (vasen), suurimman vuorokausisademäärän (keskellä) ja pisimmän poutajakson pituuden (oikea) muutoksen (%) maantieteellinen jakauma siirryttäessä jaksosta 1961–1990 jaksoon 2071–2100. Ylärivin karttakuvat (a–c) perustuvat seitsemän ja alarivin (d–f) kolmen alueellisen ilmastomallin tulosten keskiarvoon. Ajojen vaatimat reunaehdot on saatu kuvissa a–c HadAM3H-ilmastomallista ja kuvissa d–f ECHAM5/MPI-OM -mallista. Tuleville kasvihuonekaasujen pitoisuuksille on käytetty A2-skenaariota. Valkoisiksi jätetyillä maa-alueilla mallit ovat erimielisiä muutoksen suunnasta (katso kuvan 25 selitystekstiä). Väriasteikko on 10 %:n välein.

alueellisten mallikokeiden mukaan talven rankimmat vuorokausisateet voimistuvat melkein yhtä suurella prosenttimäärällä kuin kokonaissademäärä, kun taas sadepäivien määrän ja talven pisimmän sateettoman jakson pituuden suhteelliset muutokset ovat pienempiä (liite 11).

Myös kesällä rankimmat sateet voimistuvat Suomessa (kuva 25), jopa niiden alueellisten ilmastomalliajojen perusteella, joiden mukaan koko kesän sadesumma pienenesi. Vaikka rankkasateiden muutokset prosentteina laskettuina eivät ole aivan yhtä suuria kuin talvella, niin nyt ne tyypillisesti ylittävät vuodenajan koko sademäärän muutoksen suuruuden. Tulevaisuuden kesien sadeilmastoa luonnehtiikin ennen kaikkea rankkasateiden voimistuminen. Epävarmaa on sitä vastoin se, yleistyvätkö vai harventuvatko kesäiset sadepäivät koko maata ajatellen ja kestävätkö kesän pisimmät poutajakset entistä pitempään vai jäävätkö ne lyhyemmiksi (kuva 25). Käytetyt malliaineistot antavat toisistaan poikkeavia tuloksia varsinkin Pohjois-Suomelle. Jos jättää huomiotta maamme länsirannikon kuvassa 25a (perustelut liitteessä 3), näyttäisi kuitenkin siltä, että Etelä-Suomessa sadepäivät saattaisivat harveta, joskin yhtäjaksoiset poutajakset pysyisivät pituudeltaan kutakuin ennallaan. Toisaalta lämpötilojen kohoaminen kiihdyttää haihduntaa, mikä kuivattaa maaperää. Kesäisin saattaisivat vaivata siis vuoroin kuivuus, vuoroin rankkasateet, vaikka kesän kokonaissademäärät eivät juuri muuttuisi.



Kuva 25: Kesä-elokuun sadepäivien (sademäärä vähintään 1 mm) määrän (vasen), suurimman vuorokausisademäärän (keskellä) ja pisimmän poutajakson kestoajan (oikea) muutoksen (%) maantieteellinen jakauma siirryttäessä jaksosta 1961–1990 jaksoon 2071–2100 A2-skenaarion toteutuessa. Ylävirin muutokarttojen taustalla on eri maailmanlaajuinen reunahtomalli kuin alarivillä (katso kuvan 24 selitysteksti). Ylävirin valkoisiksi jätetyillä maa-alueilla kolme mallia antaa erisuuntaisen muutoksen kuin loput neljä. Alarivin valkoisella vyöhykkeellä vähintään kahden mallin antama trendin suunta vaihtuu vierekkäisten laskentapisteen välillä. Väriasteikko on 10 %:n välein.

Sateettomien jaksojen pituuden muutoksia koskeva epävarmuus ilmenee myös koko vuotta koskevissa tuloksissa. Vuositasolla sadepäivät yleistyvät koko maassa, pohjoisessa mahdollisesti Etelä-Suomea hieman enemmän. Selkeä, kaikkien alueellisten mallien antama tulos on myös rankkasateiden voimistuminen. Pisimpien poutajaksojen tulevaisuudesta erimielisyys on kuitenkin suuri. Sellaisissa simulaatioissa, joissa sadepäivien määrä ja vuoden sadesumma kasvoivat eniten, vuoden pisimmät poutajakset odotetusti lyhenivät.

Sadepäivien vuotuisen määrän ja vuoden pisimmän poutajakson muutokset korreloivat selvästi vuoden sadesumman muutoksen kanssa. Sen sijaan vaikka talven ja kesän suurempien vuorokausisateiden muutosten ja kokonaissademäärän välillä on selvä positiivinen yhteys (liite 11), niin varsinkin syksyllä (*Jylhä et al., 2007b*) ja koko vuodelle korrelaatio on vähäinen.

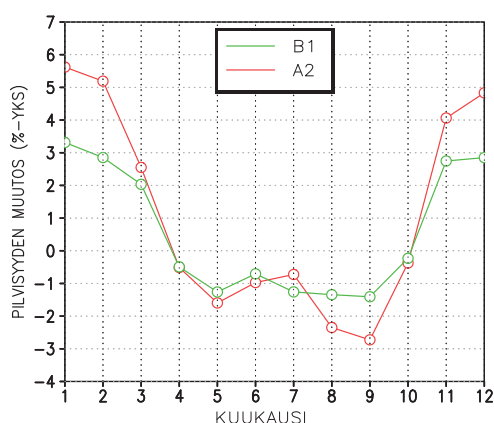
Käyttämämme alueellisten mallien aineisto tuottaa maapallonlaajuisiin CMIP3-malleihin perustuvaan todennäköisyyssennusteeseen nähden varsin edustavan otoksen sademäärän muutoksesta vuosisadan lopulle, etenkin kesän osalta (liite 11). Vastaavalla tavalla kuin minimi- ja maksimilämpötiloille, olemme pyrkineet tekemään sellaisia kvantitatiivisia arvioita sadepäivien määrän, rankkasateiden ja poutajaksojen muutoksista vuodenajoin, että ne olisivat yhteensopivia maapallonlaajuisien mallien tulosten kanssa. Arviot on tehty silmämääräises-

ti 5%:n tarkkuudella, ja ne on annettu liitteessä 11. Esimerkiksi vuodenajan kokonaissademäärän muutoksen 50. prosenttipistettä vastaava arvio siitä, miten paljon suurimman vuorokautisen sademäärän 30-vuotiskeskisarvo kasvaa, on noin 20%; epävarmuusvälin alaraja on vuodenajasta riippuen 5–10% ja yläraja 30–35%.

Jos vuodenajan suurimman vuorokausisademäärän frekvenssijakauma on likimain symmetrinen, edellä tarkasteltu 30-vuotiskeskisarvo on lähellä mediaania ja siten ylittyy keskimäärin joka toinen vuosi. Rankkasateiden muuttumista tarkasteltiin myös 10–100 vuoden toistuvuusajakojen kannalta. Yksittäisten hilaruutujen asemesta tutkimme Länsi-Suomen sisämaahan sijoittuvan alueen (60,75–62,75°N, 22,75–25,25°E) päivittäisiä aluesadantoja alueellisilla malleilla tehdyissä simulaatioissa. Kerran 10 vuodessa toistuvat aluesadannat voimistuivat kaikissa mallikokeissa tyypillisen arvon ollessa 10–30% jaksoon 2071–2100 mennessä. Monien mallitulosten mukaan kaikkein poikkeuksellisimmat rankkasateet voimistuvat prosentuaalisesti eniten, mutta koska nämä ilmiöt ovat harvinaisia, kaikki malliajot eivät saaneet tällaista muutosta kiinni. Mallikokeiden keskiarvoina lasketut toistuvuustasot ja niiden muutokset antanevat luotettavimmat tulokset. HadAM3H-mallin A2-koetta tarkentavien alueellisten mallien mukaan vuorokauden sademäärien 20 vuoden toistuvuustasot kasvavat runsaat 25% ja 50 vuoden toistuvuustasot noin 30%. Mallitulosten hajonnan perusteella lasketut 95%:n luottamusvälit olivat kuitenkin samansuuruisia kuin itse muutokset. Tämä osoittaa tulosten suurta epävarmuutta.

4.12 Nähdäänkö talvisin aurinkoa entistäkin harvemmin?

Mikäli mallituloksiin on uskomista, pilvisyys näyttäisi talviaikaan selvästi lisääntyvän (kuva 26). Koska pilvisyys jo tätä nykyä on alku- ja keskitalvesta maassamme 80%:n luokkaa, ennustettu noin viiden prosenttiyksikön lisääntyminen vähentäisi selkeän taivaan osuutta jopa neljänneksellä. Muutos synkempään suuntaan on siis varsin huomattava. Tämän vastapainoksi pilvisyys saattaisi aavistuksen vähentyä kesäpuolella vuotta, joskaan tästä mallit eivät ole kovin yksimielisiä.



Kuva 26: Prosentteina ilmaistun kokonaispilvisyyden muutos Keski-Suomessa (62,25°N, 26,25°E) vuoden eri kuukausina; verrattu jaksoa 2070–2099 jaksoon 1971–2000. Kuva perustuu 19 maapallonlaajuisen ilmastomallin tuloksiin. Punainen käyrä ilmaisee A2-skenaariota, vihreä B1-skenaariota vastaavan muutoksen.

Sopusoinnussa pilvisyyden lisääntymisen kanssa myös maanpinnalle tuleva auringonsäteily vähenee talvisin. Esimerkiksi joulukuussa pudotus on 20%:n luokkaa. Pinnalta heijastunut auringonsäteily vähenee vieläkin enemmän, maan eteläosissa yli 30%. Tähän vaikuttaa säteilyä heijastavan lumipeitteen väheneminen. Kesällä ei auringonsäteilyn määrässä ole odotettavissa suurta muutosta.

4.13 Maan kosteuden ja roudan muutoksista ristiriitaista mallitietoa

Maaperän lämpötilan laskiessa alle nollan maassa oleva vesi jäätyy ja maa routaantuu. Maailmanlaajuisten mallien tuloksista katseltiin alustavasti myös maan kosteuden ja roudan muutoksia. Nämä tiedot eivät kuitenkaan osoittautuneet riittävän laadukkaiksi tarjotakseen pohjaa muutosskenaarioiden muodostamiselle. Esimerkiksi routatiedot puuttuivat kokonaan joka toisesta mallista. Lisäksi kahdessa mallissa maaperä oli Etelä-Suomea myöten ikeroudassa, eli malleissa esiintyi routaa kesälläkin. Myös maaperän vesisisältö ja sen muutokset ilmaston lämmetessä vaihtelivat suuresti mallista toiseen. Tämä kaikki osoittaa, kuinka vaikeaa mallien on simuloida maaperän lämpö- ja kosteusoloja. Ei välttämättä tarvita kovin suurta heittoa malliteuissa lämpötiloissa, sademäärissä ja lumen määrissä, jotta se kumuloituisi suureksi virheeksi maan kosteudessa ja lämpötilassa. Se toki tuloksista oli nähtävissä, että roudan määrä varmasti vähenee tämän vuosisadan aikana.

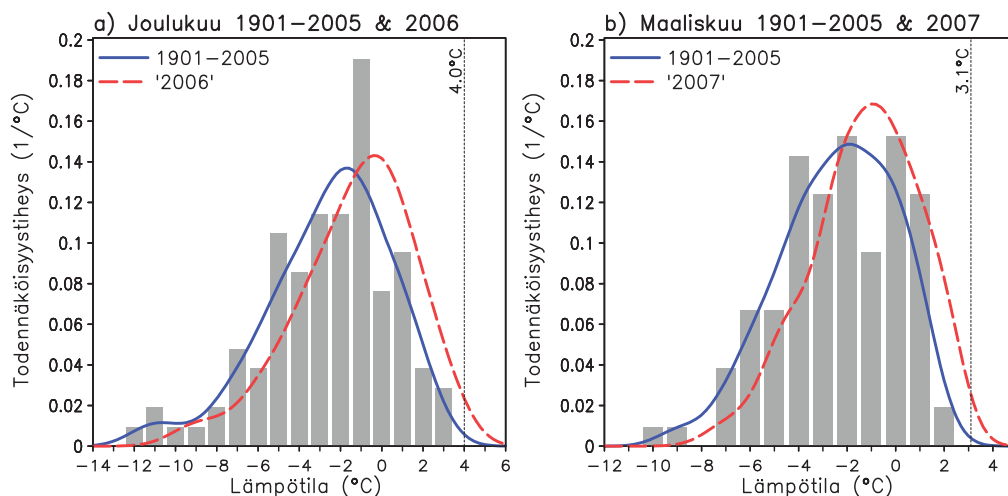
Jos on tarpeen muodostaa käytännön tarpeita palvelevia kvantitatiivisia maaperän kosteus- ja routaskenaarioita, yhtenä mahdollisuutena on käyttää erillistä maaperämallia, jolle mallien ennustamat lämpötilojen ja sademäärien muutokset annetaan syöttötietoina. Lumettomilla alueilla roudan määrää on mahdollista arvioida talven pakkassummien avulla, ja tällainen työ sisältyykin ACCLIM II -hankkeeseen.

4.14 Lyödäänkö havaitut entiset lämpötila- ja sade-ennätykset?

Keskimääräisten ilmasto-olojen muuttuessa muuttuvat myös ilmastolliset ääriarvot. Esimerkiksi suoraan havaintojen perusteella lasketut harvinaisten säätapahatumien toistuvuusajat tai -tasot (luku 4.1) eivät siksi välttämättä kuvaa kovin tarkasti nykyistä tai tulevaisuudessa odotettavissa olevaa ilmastoa. Tämä ongelma koskee etenkin lämpötilan ääri-ilmiöitä, koska kasvihuoneilmiön voimistumisen näyttää mallitulosten valossa vaikuttavan erityisen selvästi juuri lämpötiloihin.

Viime vuosiin on osunut useampia poikkeuksellisen lauhoja talvikuukausia. Esimerkiksi Helsingissä joulukuun 2006 ja maaliskuun 2007 keskilämpötilat ylittivät edelliset ennätykset noin asteella. Myös talvi 2007–2008 oli suuressa osassa Suomea ennätysleuto, vaikka ero edellisiin ennätysarvoihin olikin vain joitain kymmenesosa-asteita. Onkin luontevaa kysyä, ovatko tällaiset huippuleudot talvet vain osa ilmaston luonnollista vaihtelua vai olisiko kasvihuoneilmiön voimistumisella jo ollut sormensa pelissä.

Yksittäisen säätapahaturan yhteyttä ilmaston muuttumiseen ei voida koskaan osoittaa yksikäsitteisesti. Sen sijaan voidaan arvioida todennäköisyyksiä: kuinka usein tai harvoin havaitun kaltaisen ilmiön voisi odottaa esiintyvän muuttumattomassa ilmastossa, ja miten tämä todennäköisyys muuttuu, kun ilmastomuutoksen vaikutus otetaan huomioon?



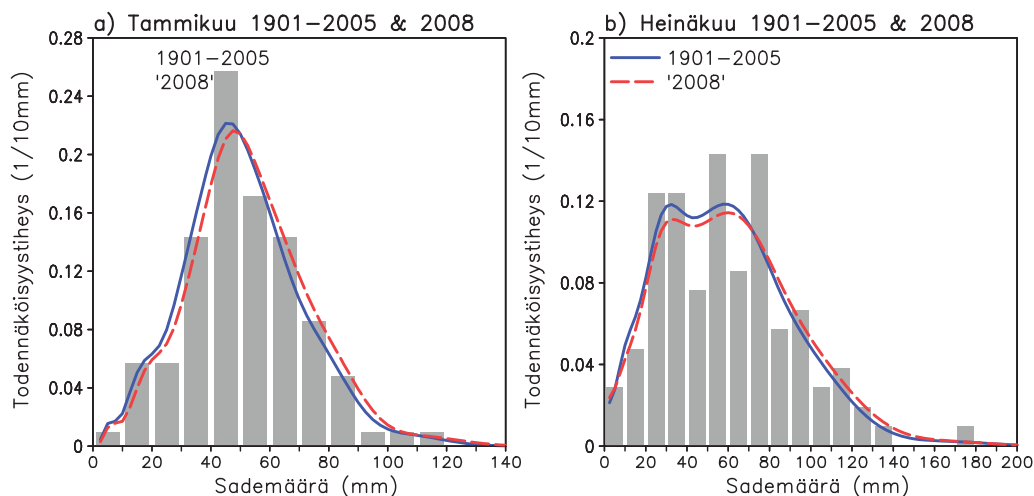
Kuva 27: (a) Joulukuun ja (b) maaliskuun keskilämpötilojen todennäköisyysjakaumat Helsingissä. Pylväät kuvaavat vuosien 1901–2005 havainnoista saatua frekvenssijakaumaa ja yhtenäiset siniset viivat näihin havaintoihin sovitettua tasoitettua jakaumaa. Punaiset katkoviivat antavat arvion nykyiselle todennäköisyysjakaumalle. Arviota varten havaittuja keskilämpötiloja on muokattu ottaen huomioon mallien simuloiman ilmaston tähänastisen lämpenemisen.

Kuvassa 27 tarkastellaan joulu- ja maaliskuuden keskilämpötilojen jakaumaa Helsingissä. Pylväät antavat lämpötilojen havaitut frekvenssijakaumat vuosina 1901–2005, siniset viivat taas kuvaavat havaintoihin sovitettuja tasoitettuja jakaumia (luvun 3.1 b-tapa). Punaiset katkoviivat puolestaan edustavat talvelle 2006–2007 laskettuja ilmastollista jakaumia, toisin sanoen todennäköisyysjakaumia joulukuun ja maaliskuun keskilämpötiloille, jotka olisi periaatteessa voitu havaita kyseisenä talvena. Näitä jakaumia laskettaessa on käytetty hyväksi jo havaittuja maapallon keskilämpötilan muutoksia ja ilmastomallien tuloksia (luvun 3.1 iii-tapa ja liite 7).

Nykyistä talvi-ilmastoa vastaavat lämpötilan todennäköisyysjakaumat ovat siirtyneet systemaattisesti oikealle suoraan jakson 1901–2005 havainnoista laskettuun jakaumaan verrattuna. Siirtymä on keskimäärin hiukan yli 1°C . Se on kuitenkin hiukan pienempi jakauman ylä- kuin alapäässä, koska melkein kaikki mallit ennustavat talvilämpötilojen vaihtelevuuden vähenevän ilmaston lämmitessä.

Vuosien 1901–2005 ilmastoa edustavien todennäköisyyskäyrien perusteella talvella 2006–2007 havaitut joulukuun ja maaliskuun keskilämpötilat olisivat olleet hyvin harvinaisia. Arvioitu toistuvuusajaksi vähintään $4,0^{\circ}\text{C}$:n keskilämpötilalle joulukuussa olisi ollut yli 300 vuotta ja toistuvuusajaksi vähintään $3,1^{\circ}\text{C}$:n keskilämpötilalle maaliskuussa noin 700 vuotta¹⁸. Nykyistä ilmastoa edustavien käyrien mukaan vastaavat toistuvuusajat ovat kuitenkin monin verroin lyhyempiä: joulukuussa n. 60 vuotta ja maaliskuussa n. 80 vuotta. Samansuuntainen tulos saadaan läpileutoa talvea 2007–2008 tarkasteltaessa. Helsingin joulukuun keskilämpötila ($+1,3^{\circ}\text{C}$) oli niin korkea, että aiempien havaintojen perusteella näin lauhan talven olisi voinut

¹⁸Teoreettiseen ääriarvojakaumaan perustuvan, luvussa 4.1 hyväksi käytetyn extRemes-laskentaohjelman (liite 4) mukaan talvella 2006–2007 havaitut joulukuun ja maaliskuun keskilämpötilat olivat niin poikkeavia, ettei ohjelma kyennyt määrittämään niille äärellisen pituisia toistuvuusajaksia. Siksi ei ole syytä olettaa, että tässä kohdissa käytetty Gaussin ytimeen perustuva tasoitusmenetelmä (liite 7) ainakaan yliarvioisi näiden huippukorkeiden kuukausikeskilämpötilojen toistuvuusajaksia.



Kuva 28: (a) Tammikuun ja (b) heinäkuun kuukausisademäärien todennäköisyysjakaumat Helsingissä. Pylväät kuvaavat vuosien 1901–2005 havainnoista saatua frekvenssijakaumaa ja yhtenäiset siniset viivat näihin havaintoihin sovitettua tasoitettua jakaumaa. Punaiset katkoviivat antavat mallitulosten avulla lasketun arvion nykyiselle todennäköisyysjakaumalle.

odottaa toistuvan enintään kerran 200 vuodessa. Ilmastonmuutos huomioon otettaessa paras arvio nykyisestä toistuvuusajasta lyhenee noin 35 vuoteen.

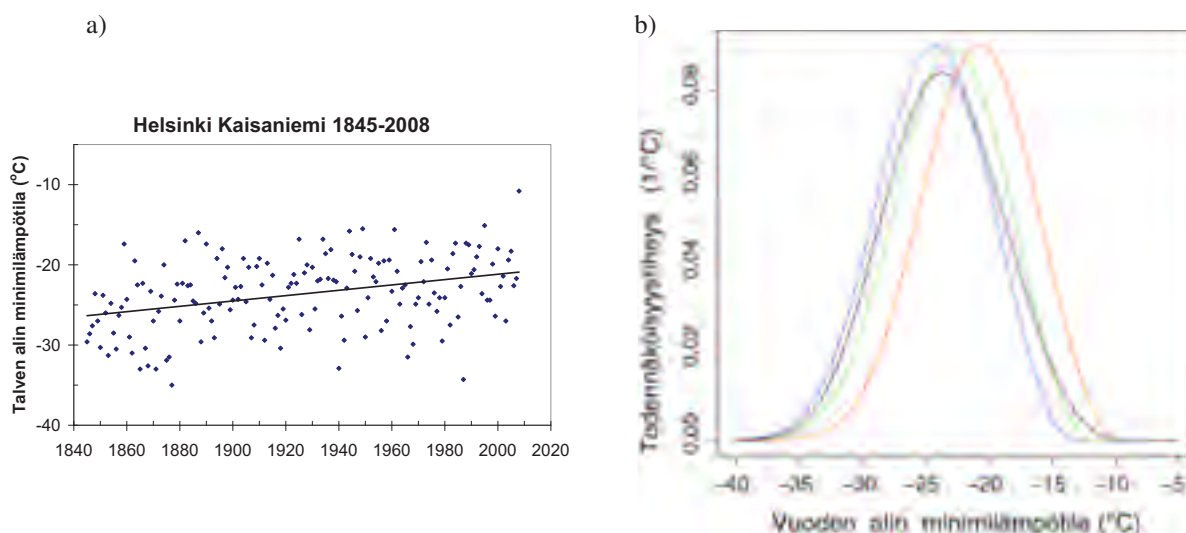
Jo tähänastinen ilmastonmuutos näyttäisi siis moninkertaistaneen äärimmäisen leutojen talvi-kuukausien tai kokonaisten talvien esiintymistodennäköisyyden. Tulevaisuudessa, maapallon ilmaston yhä lämmitessä, niiden todennäköisyys edelleen kasvaa. Jos muutos etenee mallitulosten antaman parhaan arvion mukaan, niin vuoden 2020 paikkeilla esimerkiksi vähintään 1.3°C:n lämpöisten talvien osuus Helsingissä olisi kasvanut jo 5%:iin (kerran 20:ssä vuodessa) ja vuosisadan puolivälissä 20%:iin (kerran viidessä vuodessa).

Saman menetelmän avulla voidaan arvioida myös muutoksia sademäärän todennäköisyysjakaumissa. Kuvassa 28 annetaan esimerkkinä tammi- ja heinäkuun sademäärän jakaumat Helsingissä. Ero nykyistä ilmastoa ja vuosia 1901–2005 edustavien todennäköisyyskäyrien välillä on kuitenkin pieni, koska kasvihuoneilmiön voimistuminen vaikuttaa malleissa sadeoloihin suhteessa paljon heikommin kuin lämpötiloihin. Tällainenkin muutos kuitenkin tekee runsas-sateiset kuukaudet hiukan aiempaa yleisemmiksi. Vuosien 1901–2005 havaintojen perusteella esimerkiksi 80 mm:n sadekertymä ylittyisi tammikuussa noin 8% todennäköisyydellä, ilmastonmuutos huomioon otettaessa laskelmamme mukaan taas noin 10% todennäköisyydellä. Vastaaviksi prosenttiluvuiksi vähintään 100 mm:n kuukausisademäärälle heinäkuussa saadaan 11% ja 13%. Vielä harvemmin toistuvia äärisateita tarkasteltaessa havaitun ilmaston ääriarvojen määräämiseen liittyvä tilastollinen epävarmuus lienee kuitenkin nykyisellään ja lähitulevaisuudessa suurempi virhelähde kuin ilmaston muutosten huomioimatta jättäminen. Vielä vuosisadan lopullakin sademäärien toistuvuustasojen muutosten kvantitatiiviset arviot ovat kovin epävarmoja, kuten ilmeni luvun 4.11 loppuosassa.

Ilmastonmuutoksen myötä kasvaa siis todennäköisyys, että korkeiden lämpötilojen ennätykset rikkoontuvat aiempaa lyhyemmin väliajoin, ja samoin käy vähitellen myös sade-ennätyksille. On kuitenkin vielä kerran painotettava ilmastomme ja siten myös ääritilanteiden luonnollista

vaihtelua ja niihin liittyvää tilastollista epävarmuutta. Absoluuttisesti korkein tähän mennessä Suomessa mitattu lämpötila saavutettiin jo v. 1914 (luku 5.3), korkein kuukausilämpötila 11 vuotta myöhemmin, ja suurin vuorokausi- ja kuukausisademäärä myös jo 1930- ja 1940-luvuilla. Vastaavasti voimassa olevat pakkas- ja lumensyvyysennätykset ovat niinkin tuoreita kuin vuosilta 1999 ja 1997.¹⁹

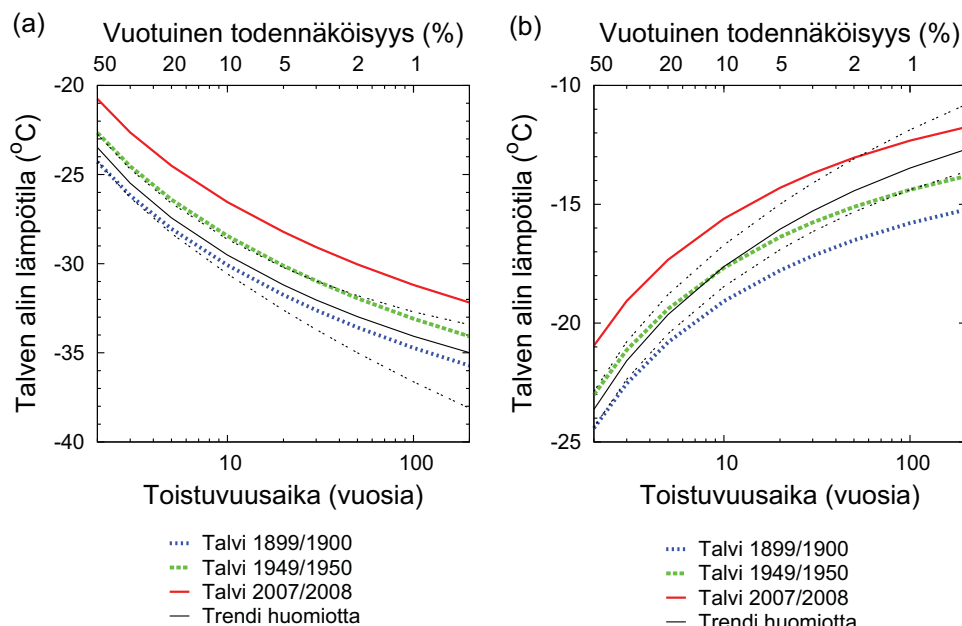
Toisaalta esimerkiksi Helsingissä absoluuttisten kylmyysennätysten (talvilta 1876/1877 ja 1986/1987) lyöminen on käymässä vähitellen yhä epätodennäköisemmäksi. 1800-luvun puolivälistä alkava talven alimpien minimilämpötilojen havaintoaikasarja sekä havaintoihin sovitettu lineaarinen trendi on esitetty kuvassa 29a. Havainnot osoittavat selvän lämpenevän suuntauksen. Kyseisiin havaintoihin ei ole tehty kaupunkirakenteen tiivistyessä voimistuneen lämpösaarekkeen huomioon ottavaa korjausta, joten tämä ilmiö näkyy osaltaan trendissä. Ääriarvojakauman sopivuus havaintoihin paranee, kun sen ns. sijaintiparametrin annetaan muuttua (lineaarisesti) ajan mukana (luvun 3.1 ii-tapa). Kuvasta 29b nähdään todennäköisyysjakauman siirtyminen ajan myötä kipeämmistä kohti lauhempia pakkasia. Vertailun vuoksi kuvaan on piirretty myös jakauma, joka ei ota huomioon havainnoissa näkyvää nousevaa trendiä.



Kuva 29: Talvikauden alin minimilämpötila Helsingissä. (a) Havainnot vuosina 1845–2008 (alkuperäiset havainnot, joissa on mukana kaupungin lämpösaarekeilmiön vaikutus) sekä havaintoihin sovitettu suoraviivainen trendi. (b) Havaintoihin sovitetun todennäköisyysjakauman (GEV-ääriarvojakauma) muuttuminen havaitun lämpenemisen myötä. Värilliset käyrät esittävät talvien 1899/1900 (sininen), 1949/1950 (vihreä) ja 2007/2008 (punainen) ilmastoja vastaavia jakaumia. Musta käyrä esittää tulosta, joka saadaan, jos lämpenevää trendiä ei oteta huomioon.

Kuva 30 esittää jakaumiin perustuen 2–200 vuoden toistuvusaikoja (eli 0,5–50% vuotuisia todennäköisyyksiä) vastaavia toistuvuustasoja toisaalta (a) kireimpien ja toisaalta (b) lauhimpien pakkasten osalta. Nähdään, että eri toistuvusaikoja vastaavat minimilämpötilat ovat kohonneet sadassa vuodessa 3,5 astetta (jakauman mahdollisen muodon muuttumista ei ole tässä otettu huomioon). Kylmempää kuin -28°C on viime vuosien havaintojen nojalla keskimäärin

¹⁹Verkkosivu http://www.ilmatieteenlaitos.fi/saa/tilastot_34.html.



Kuva 30: 2–200 vuoden toistuvuusajoja (0,5–50%:n vuotuista todennäköisyyttä) vastaavien talven alimpien lämpötilojen kohoaminen Helsingin Kaisaniemessä havaitun lämpenemisen myötä. (a) Todennäköisyys (ja vastaava toistuvuus aika) sille, että talven aikana mitataan kireämpi pakkas kuin pystyakselilla annettu lämpötila. (b) Todennäköisyys (toistuvuus aika) sille, että lämpötila pysyy koko talven ajan lauhempaa kuin pystyakselin lämpötila. Siniset, vihreät ja punaiset käyrät esittävät talvien 1899/1900, 1949/1950 ja 2007/2008 ilmastoa vastaavia tuloksia. Musta yhtenäinen käyrä esittää tuloksia, kun lämpenevä trendi jätetään huomiotta, ja mustat katkoviivat ilmaisevat näiden tulosten 95%:n luottamusvälin. Huomaa toisistaan poikkeavat pystyakselien asteikot.

kerran vajaassa 20 vuodessa, kun puoli vuosisata aiemmin todennäköisyys oli vielä kaksinkertainen (kuva 30a). Toisaalta kuvan 30b mukaan todennäköisyys, ettei lämpötila laske Helsingissä talvikauden aikana kertaakaan alle -15 asteen, on nelinkertaistunut 50 vuodessa. Talvella 2007/2008 mitatun ennätysellisen korkean vuoden alimman lämpötilan ($-10,8^{\circ}\text{C}$, kuva 29a) toistuvuus aika on kuitenkin analyysin perusteella edelleen satoja vuosia.

Koska lämpösaarekeilmiö on mukana havainnoissa, tulokset kuvaavat nimenomaan Helsingin Kaisaniemen minimilämpötiloja, ei kvantitatiivisessa mielessä koko Etelä-Suomen muutoksia. Lämpösaarekeilmiön ja kasvihuoneilmiön voimistumisen lisäksi kolmas tärkeä mittaustuloksiin vaikuttava tekijä on Pohjois-Atlantilta puhaltavien leutojen länsituulten voimakkuuden vaihtelu talvisin (ns. Pohjois-Atlantin värähtely NAO), joskin myös NAO:n muuttuminen voi osin liittyä kasvihuoneilmiön voimistumiseen. Ääriarvojakauman määrittämisessä selittävä tekijänä voidaankin käyttää myös esim. NAO-indeksiä; tähän pyritään palaamaan ACCLIM II -hankkeessa.

4.15 Tulosten yhdistelmiä

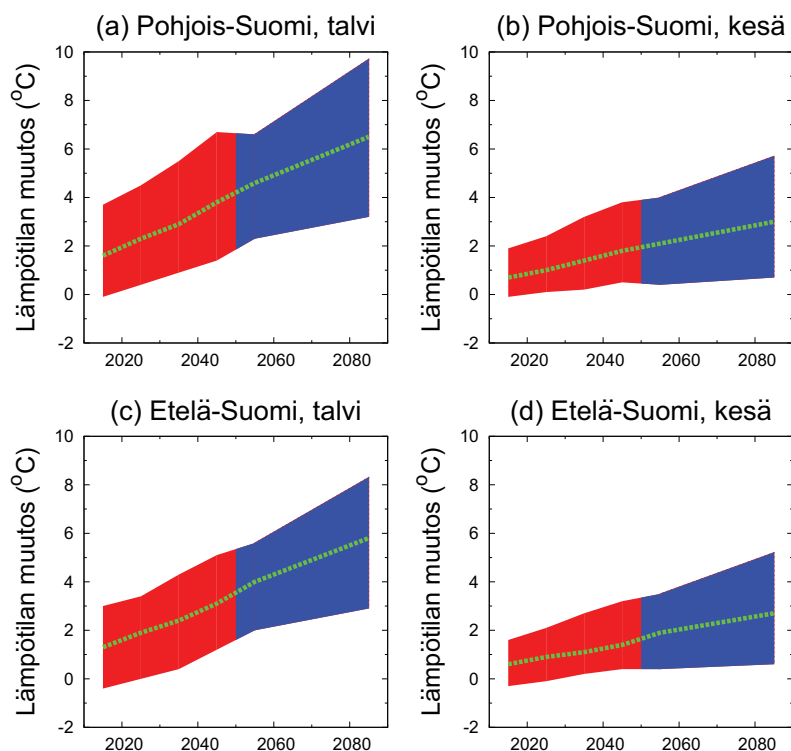
Taulukkoon 3 on koottu kvalitatiivinen kuvaus tässä raportissa tarkasteltujen ilmastosuureiden muuttumisesta maamme etelä- ja pohjoisosassa tämän vuosisadan loppupuolelle tultaessa. Vuosisadan alkupuolta koskeva yhteenvetotaulukko näyttäisi pitkälti samanlaiselta, joskin muutokset olisivat pienempiä ja "säilyy suunnilleen ennallaan" -arviota esiintyisi useammin, näin etenkin kesällä. Poikkeuksen muodostaa nollapistepäivien lukumäärä. Voidaan päätellä, että lämpötilan kohotessa jouluihelmikuun nollapistepäivät yleistyvät aluksi etelässäkin. Vasta ajan myötä, lämpenemisen jatkuessa, tilanne muuttuu taulukon 3 osoittamaksi.

Kahdella eri menetelmällä laaditut talven ja kesän keskilämpötilan muutoksen todennäköisyyssennusteet on yhdistetty koko vuosisadan kattavaksi kuvaksi 31. Esitetyt ilmastomuutoksen

Taulukko 3: Suuntaa antava kuvaus ilmastosuureiden muutoksista Etelä- ja Pohjois-Suomessa vuosisadan lopulle mentäessä vuodenajoin (XII-II: jouluihelmikuu, III-V: maaliskoukokuu, VI-VIII: kesä-elokuu, IX-XI: syysmarraskuu).

Muuttuja	Alue	XII-II	III-V	VI-VIII	IX-XI	Vuosi	Huomautuksia
Keskilämpötila	Pohjoinen	+	+	+	+	+	Lämpötilan nousu pienintä kesällä.
	Etelä	+	+	+	+	+	
Keskimääräinen sademäärä	Pohjoinen	+	+	+	+	+	
	Etelä	+	+	/	+	+	
Termisen vuodenajan pituus	Pohjoinen	-	/	+	/		
	Etelä	-	+	+	+		
Vuorokauden ylin lämpötila	Pohjoinen	+	+	+	+	+	Lämpötilan nousu pienintä kesällä.
	Etelä	+	+	+	+	+	
Vuorokauden alin lämpötila	Pohjoinen	+	+	+	+	+	Lämpötilan nousu pienintä kesällä.
	Etelä	+	+	+	+	+	
Pakkaspäivien lukumäärä	Pohjoinen	-	-	-	-	-	
	Etelä	-	-	-	-	-	
Nollapistepäivien lukumäärä	Pohjoinen	+	-	-	-	/	Aluksi talven nollapistepäivät yleistyvät myös etelässä.
	Etelä	/	-	-	-	-	
Lumen vesiarvo	Pohjoinen	-	-		-	-	Vähentäminen alkaa etelästä, samoin syksystä ja keväästä.
	Etelä	-	-		-	-	
Lumipeitepäivien lukumäärä	Pohjoinen	-	-		-	-	Vähentäminen alkaa etelästä, samoin syksystä ja keväästä.
	Etelä	-	-		-	-	
Sadepäivien määrä	Pohjoinen	+	+	()	+	+	
	Etelä	+	()	-	()	+	
Rankkasateiden voimakkuus	Pohjoinen	+	+	+	+	+	
	Etelä	+	+	+	+	+	
Sateettomien kausien pituus	Pohjoinen	/	-	()	-	-	
	Etelä	-	()	()	()	()	
Pilvisuus	Pohjoinen	+	/	(-)	/	+	
	Etelä	+	/	(-)	/	+	
Roudan määrä	Pohjoinen	-	-		-	-	Laskelmat tehty lumettomille alueille (tiet, lentokentät, jne.)
	Etelä	-	-		-	-	

- + = Lisääntyy/kasvaa huomattavasti
- + = Lisääntyy/kasvaa huomattavasti
- = Vähenee huomattavasti
- = Vähenee huomattavasti
- / = Säilyy suunnilleen ennallaan
- () = Muutos hyvin epävarma
- () = Ei osata sanoa tai merkityksetön



Kuva 31: Todennäköisyysennuste talven (vasemmalla) ja kesän (oikealla) keskilämpötilan muutoksille Pohjois-Suomessa (yläriivi) ja Etelä-Suomessa (alarivi) tämän vuosisadan kuluessa. Vihreä käyrä kuvaa parasta arviota (mediaani). Vanan alareuna vastaa todennäköisyysjakauman 5. ja yläreuna 95. prosenttipistettä. Arviot perustuvat noin 20 maailmanlaajuisen ilmastomallin tuloksiin. Niitä laadittaessa A1B-, A2- ja B1-kasvihuonekaasuskenaariot on kukin oletettu yhtä todennäköisiksi, joskin vuosisadan alkupuolella (punainen alue) niiden eroja ei ole otettu huomioon, mutta sen sijaan on painotettu luonnollisen vaihtelun merkitystä.

epävarmuusvälit ennen ja jälkeen v. 2050 eivät tarkkaan ottaen ole täysin vertailukelpoisia, sillä vuosisadan alkupuoliskolle käytetty menetelmä painottaa ilmaston luonnollisen vaihtelun merkitystä, kun taas loppupuoliskoa varten käytetyssä menetelmässä sen aiheuttaman hälyn osuutta on pyritty minimoimaan ja sen sijaan otetettu huomioon erilaiset oletukset kasvihuonekaasujen päästökehityksestä (luku 3.3). Selvimmin tämä menetelmien eroista aiheutuva epäjatkuvuus ilmenee Pohjois-Suomen talvikuvassa 31a.²⁰ Joka tapauksessa nähdään, kuinka talvet lauhtuvat ennusteiden mukaan selvästi nopeammin kuin mitä kesät lämpenevät.

Tämän raportin tulosten nojalla voidaan päätellä, että havaintojen pohjalta luvussa 4.1 määritetyt sään ääri-ilmiöiden esiintymisen todennäköisyydet tulevat kasvamaan (ja toistuvuusajat lyhenemään) helteille ja runsaille sateille, mutta pienenemään kireille pakkasille, kun taas vähäsateisten jaksojen toistuvuusajat eivät ehkä juuri muutu.

²⁰Kuvan vanat esittävät ennen 2050-lukua yksittäisen etelä- tai pohjoissuomalaisen hilapisteen tuloksia (pisteet (60°N, 25°E) ja (67.5°N, 27.5°E)), sen jälkeen maamme etelä- ja pohjoispuoliskon aluekeskiarvoja (leveyspiirin 63.75°N etelä- ja pohjoispuoli). Kuva perustuu taulukkoon 1 ja liitteeseen 9 sekä kuvien 13–14 ja liitteen 10 taustalla oleviin tuloksiin.

5 Ilmastotiedon hyödyntämisestä sopeutumistutkimuksissa

ACCLIM-hankkeen tavoitteena on tuottaa ISTO-tutkimusohjelman hankkeille yhteistä ilmastotietopohjaa ja samalla edistää ilmastomuutostiedon hyödyntämistä mahdollisimman laajamittaisesti jo ilmastomuutoksen sopeutumistoimien tutkimus- ja suunnitteluvaiheessa. Tämä tukee päätöksentekoa siitä, mitä on otettava välittömästi huomioon lyhyen aikavälin riskienhallinnan suunnittelun kannalta, mitä pidemmällä aikavälillä. Niinpä tärkeä osa hanketta on vuorovaikutus muiden tutkimustahojen kanssa.

5.1 Ilmastotiedon tarpeet ja käytön opastus

Hankkeen tehtävänä on tuottaa tietoa Suomen ilmastosta säähavaintoihin ja ilmastomallikokeisiin perustuen. Suomea koskevien yleisten ilmastomuutosarvioiden lisäksi hankkeessa on laadittu analyysejä mm. äärimmäisten sääilmiöiden toistuvuuksista ja toimitettu aineistoja ilmastomuutoksen vaikutusten ja niihin sopeutumisen tutkimukseen. Ilmastotiedon käyttäjien tarpeita kartoitettiin kyselyillä ISTO-tutkimusohjelman hankkeille vuosina 2006 ja 2007 sekä vuonna 2008 järjestetyssä työpajassa, jossa esiteltiin tuloksia ja kokemuksia niiden käytöstä. Muun muassa erilaisista tutkimustavoitteista ja -menetelmistä johtuen tutkimushankkeiden tiedontarpeet ovat moninaiset ja poikkeavat toisistaan. Kyselyn tulokset ohjasivat ilmastoaineistojen laadintaa, mutta samalla kävi ilmi, että tarvitaan kunkin käyttäjän tarpeisiin ”räätälöityjä” tietoaineistoja. Toisaalta tutkimusohjelman eri hankkeiden tulosten tulisi olla vertailukelpoisia, joten niissä käytettävien ilmastoskenaarioidenkin tulee olla yhteismitallisia.

Useat ISTO-tutkimusohjelman tutkijat ovat hyödyntäneet ACCLIM-hankkeen analyysejä tai aineistoja, jotka julkaistaan hankkeen kotisivuilla (www.fmi.fi/acclim) useimmiten jo ennen kuin painetussa muodossa. Erillisiä tietoaineistoja oli vuoteen 2008 mennessä toimitettu seuraaville hankkeille (huom. kaikki eivät ole ISTO-hankkeita):

- TOLERATE – kohti äärimmäisten sääolosuhteiden edellyttämää sopeuttamisastetta
- ILMASOPU – Ilmastomuutokseen sopeutuminen maa- ja elintarviketaloudessa
- WaterAdapt – Suomen vesivarat ja ilmastomuutos - vaikutukset ja muutoksiin sopeutuminen
- EXTREFLOOD II – Tulvatuhojen minimointi: tulvaskenaariot, tuhojen arvottaminen ja riskikartoitus
- Metsikön kasvu muuttuvassa ilmastossa - yleisen mallisysteemin kehittäminen
- FINESSI-verkkotyökalun laajentaminen ISTO-hankkeiden tarpeisiin
- RATU – Rankkasateet ja taajamatulvat
- EXWE – Sään ääri-ilmiöt ja ydinvoimalaitokset
- Metlan tutkimusohjelma Metsäekosysteemien toiminta ja metsien käyttö muuttuvassa ilmastossa (MIL)
- Joensuun yliopiston metsätieteellinen tutkimus
- Helsingin yliopiston metapopulaatiobiologinen tutkimus ja agroekologinen tutkimus.

Hankkeen tutkijoiden asiantuntemusta ilmastosta ja sen muutoksista on ollut muiden ISTO-hankkeiden käytössä yhteistutkimuksissa (TOLERATE, ILMASOPU, EXTREMES II) ja ohjausryhmän jäsenyyksien kautta (READNET, FINESSI). ACCLIM-hankkeen arvioita ilmastomuutoksessa on hyödynnetty erilaisissa tutkimuksissa ja selvityksissä liikenteen alalla (*Merenkululaitos, 2009; Tiehallinto, 2009*), metsäalan (*Niskanen ym., 2008*) ja kulttuuriympäristön (*Berghäll ja Pesu, 2008*) kannalta sekä ainakin Espoon kaupungin (*Soini, 2007*) ja Pohjois-Pohjanmaan ilmastostrategian valmisteluissa. Tuloksia on esitelty myös muille käyttäjäryhmille (mm. energia-ala, yhdyskuntasuunnittelu, kansanterveys), ja niitä on käytetty suurelle yleisölle tarkoitetuissa yleistajuisissa julkaisuissa (*Nevanlinna 2008, Karttunen ym., 2008; Rinne ym., 2008*).

Niiden tutkijoiden, jotka käyttävät tai aikovat käyttää ACCLIM-hankkeen tuottamia ilmastotietoja, tulisi perehtyä tähän raporttiin ja hankkeen www-sivuilla julkaistavaan materiaaliin. Yleisnäkökulman ilmastokenaarioiden käyttöohjeen laatiminen on hankalaa, jollei mahdollista. Sen sijaan esitämme muutamia kysymyksiä, joita käyttäjien olisi syytä pohdiskella ennen ilmastokenaarioiden käyttöä tutkimuksissaan:

- Mikä on tutkimusongelma, johon haet vastausta? Millaisia arvioita ilmastomuutoksesta sen ratkaisuun tarvitaan?
- Kuinka monta ilmastomuutosskenaarioita tarvitset tai pystyt käyttämään?
- Mitä epävarmuuksia aiot tutkia? Tarvitsetko eri päästökkenaarioihin perustuvia ilmastomuutoksen arvioita vai mieluummin samalla kertaa kolme eri päästökkenaariota yhdistäviä ennusteita? Kuinka tärkeää on tutkimuksesi kannalta tuntee ilmaston luontaisesta vaihtelusta ja ilmastomallien vajavaisuudesta johtuvat epävarmuudet?
- Mitä maantieteellistä aluetta ja ajanjaksoa tutkit? Millä tarkkuudella tarvitset ilmastotietoa (paikka ja aika)?
- Mitä ilmastoa kuvaavia suureita tarvitset?
- Koska ilmastokenaarioita ei aina ole mahdollista laatia kaikkien toiveiden mukaan, mistä tarpeistasi pystyt tinkimään?
- Parantaisiko ilmastotiedon asiantuntijan apu tutkimustasi?

Tutkimuksissa tulisi ottaa huomioon ilmastokenaarioihin liittyviä rajoituksia. Alla on muutamia keskeisimpiä tyypillisiä puutteellisuuksia:

- Havainto- ja ilmastomalliaineistot eivät ole aina yhteismitallisia.
- Ilmastomalleissa ja/tai -havainnoissa voi esiintyä systemaattista virhettä.
- Ilmastomalleissa ja/tai -havainnoissa voi olla puutteita äärevien tilanteiden kuvauksessa
- Ilmastomallien ajallinen ja/tai paikallinen erotuskyky ei ole riittävä.
- Erilaisiin alueellisen tiedon tarkentamismenetelmiin liittyy rajoituksia.
- Mallien tulokset voivat olla joidenkin suureiden osalta ristiriitaisia.
- Eri mallien tuloksia yhdistävät skenaariot eivät välttämättä ole yhteismitallisia kaikkien ilmastosuureiden osalta.

Seuraavaksi tarkastellaan tässä raportissa esitettyjä tuloksia ilmastollisista keskiarvoista ja ääri-ilmiöistä niiden soveltamisen kannalta.

5.2 Keskimääräisilmaston muutokset

Tulevaa ilmastoa ja sen muuttumisen nopeutta koskevat ennusteet ovat pakostakin epävarmoja. Kasvihuonekaasujen tulevia päästöjä ja pitoisuuksia ei tiedetä tarkasti, ja eri ilmastomallit antavat erilaisia arvioita siitä, kuinka voimakkaasti ilmakehän koostumuksen muutokset vaikuttavat ilmastoon. Lisäksi ilmasto vaihtelee myös luonnostaan vuodesta ja vuosikymmenestä toiseen, eikä näitä luonnollisia vaihteluista voida juurikaan ennustaa. Nämä kaikki epävarmuustekijät tulisi ottaa huomioon, kun tutkitaan ilmastonmuutosten käytännön vaikutuksia ja tehdään johtopäätöksiä sopeutumistoimien kiireellisyydestä. Hyvä tapa epävarmuusasteen havainnollistamiseksi on ennusteiden esittäminen todennäköisyysjakaumina.

Jo toteutunutta ja lähitulevaisuudessa odotettavissa olevaa ilmastonmuutosta tutkittaessa epävarmuutta aiheutuu luonnollisista vaihteluista ja mallitulosten eroavaisuudesta, kun taas kasvihuonekaasuista johtuva epävarmuus ei vielä tässä vaiheessa ole merkittävää (kuva 1). Mallitulosten perusteella jo ensi vuosikymmen (2011–2020) on Suomessa vuositasolla vertailujaksoa 1971–2000 lämpimämpi yli 95% todennäköisyydellä. Lähestyttäessä vuosisadan puoliväliä (v. 2041–2050) lämpötilan nousua voidaan pitää jo käytännöllisesti katsoen varmana (todennäköisyys > 99%). Paras arvio vuosikymmenkeskiarvojen nousunopeudelle Suomessa vuosisadan alkupuolella on 0,4–0,5°C kymmentä vuotta kohti. Toki joukkoon saattaa hyvinkin mahtua joitain nykymittapuunkin mukaan viileitä vuosia tai vuodenaikoja, vaikka vuosikymmenet kokonaisuudessaan vertailujaksoa lämpimämpiä ovatkin.

Pitemmän tähtäimen ennusteet ovat lähitulevaisuuden todennäköisyysennusteita epävarmempia, sillä ilmastomallien väliset erot ja ennen kaikkea kasvihuonekaasujen päästöjen tuleva kehitys vaikuttavat tuloksiin paljon enemmän. Lisäksi myöhemmin tällä vuosisadalla koettaville ilmastonmuutoksille laadittuja todennäköisyysjakaumia on syytä pitää ehdollisina ja pikemmin suuntaa antavina kuin täsmällisinä. Niitä laadittaessa on nimittäin käytetty kahta melko rohkeaa olettamusta:

- Tulevat kasvihuonekaasujen päästöt noudattavat joko B1-, A1B- tai A2-skenaariota, ja kaikki kolme skenaariota on oletettu yhtä todennäköisiksi.
- Työn pohjana käytetyt 19 ilmastomallia osaisivat keskimäärin kuvata ilmaston muutosta harhattomasti, ja malleja voitaisiin pitää ominaisuuksiltaan niin erilaisina, että niiden antamia tuloksia vertailemalla saadaan pääteltyä malleihin liittyvä epävarmuus.

Toisaalta pienten päästöjen B1- ja suurten päästöjen A2-skenaario ovat kyllä varsin ääreviä. Tuntuu hyvin uskottavalta, että kasvihuonekaasujen tulevat päästöt osuvat jonkin näiden ääri vaihtoehtojen välimaastoon. Lisäksi lämpenemisen ääriskenaarioita kuvaavat 5. ja 95. prosenttipisteet ovat kaukana jakauman reunoilla. Ei siis näyttäisi kovin todennäköiseltä, että tuleva lämpötilan nousu tai sademäärän muutos olisivat ainakaan paljoa esitetyn ala-arvion alapuolella tai yläarvion yläpuolella.

Huonona puolena menetelmässä on, että kaikkien epävarmuustekijöiden yhtäaikainen huomioonottaminen johtaa ennusteessa varsin leveään epävarmuushaarukkaan. Täten esimerkiksi vuosisadan lopulle (v. 2070–2099) ennustettu vuoden keskilämpötilan nousu on jotakin 2,0°C ja 6,5°C välillä ja vuotuisen sademäärän lisääntyminen 7–26% (kuva 14). Ilmastonmuutoksen

vaikutus luontoon ja ihmisten elämään on tietysti aivan erilainen muutoksen ylä- kuin alapään toteutuessa.

Ilmastotutkijoiden parissa vallitsee kuitenkin laaja yhteisymmärrys, että tulevaisuuden ilmastoa kuvaavat arviot tulisi ilmaista mahdollisuuksien mukaan todennäköisyysjakaumien muodossa. Vaikutus- ja sopeutumistutkimuksen kannalta tällaiset todennäköisyysennusteet ovat toki haasteellisia, sillä ne johtavat helposti laskelmien määrän moninkertaistumiseen. Onkin siis tärkeä selvittää, miten todennäköisyysjakaumien sisältämä oleellisin informaatio saataisiin hyödynnettyä mahdollisimman pienellä lisätyöllä.

Esittämiämme ilmastonmuutoksen skenaarioita voidaan hyödyntää sovellutustutkimuksissa esimerkiksi seuraavaan tapaan:

1. Mikäli halutaan käyttää analyysien pohjana vain yhtä ainoaa ilmastonmuutosennustetta, valittakoon mediaaniskenaario (50 %:n piste). Tämä mediaanimuutos on käytännössä lähes sama kuin A1B-skenaariota vastaava 19 mallin ennustusten keskiarvo.
2. Kun tarkastellaan vain yhtä ilmastosuuretta, esimerkiksi lämpötilaa, ja halutaan ottaa tutkimuksessa huomioon ilmastoennusteiden epävarmuus, tulee laskelmien pohjana käyttää vähintään kolmea muutosarviota (esim. jakauman 5., 50. ja 95. prosenttipiste).
3. Mikäli tutkimuksessa on tärkeää ottaa huomioon sekä ilmastoennusteiden epävarmuus että lämpötilan ja sademäärän muutosten yhteisvaikutus, tilanne on monimutkaisempi. "Paras arvio" tulevasta ilmastosta voidaan tällöinkin laskea ottamalla sekä lämpötilan että sademäärän muutoksesta mediaaniskenaario. Sen lisäksi voidaan tarkastella erilaisia yhdistelmiä, joissa lämpötilan ja sademäärän muutoksille annetaan vuoroin jakauman ala-, vuoroin yläpään arvoja. Asiaan liittyy kuitenkin kaksi vaikeuttavaa tekijää:
 - Kahden muuttujan yhteisskenaarioita käytettäessä todennäköisyys sille, että molemmat muuttujat saavat yhtaikaisesti paljon mediaanista poikkeavia arvoja, on selvästi pienempi kuin että yhdelle muuttujalle käy näin. Sen tähden esim. yläskenaarioksi ei tässä tapauksessa ole syytä ottaa 95 %:n pistettä vaan joku pienempi fraktiili.
 - Tulkinnanvaikeutta tuo myös muuttujien keskinäinen korrelaatio. Esimerkiksi talvisin lämpötilan ja sademäärän muutokset malleittain korreloivat positiivisesti: niillä malleilla, joissa lämpötila kohoaa muihin malleihin verrattuna paljon, myös sademäärän lisäys on tyypillisesti suuri. Kesällä taas näiden muuttujien muutokset korreloivat Suomessa negatiivisesti.

Ongelmiin ei ole tähän mennessä löydetty helppoa rautalankaratkaisua. — Tällaista kahden muuttujan tarkasteluun perustuvaa lähestymistapaa voi joutua käyttämään esimerkiksi haarukoitaessa metsä- tai viljelykasvien tulevia kasvuolosuhteita.

4. Riskiarviotutkimuksissa (esim. patojen mitoittaminen tulvien varalta) tärkeintä on usein selvittää pahin mahdollinen tulevaisuudenkuva. Tällöin olisi perusteltua tarkastella ensisijaisesti yläskenaariota, esim. 95. prosenttipistettä.

Yläskenaario on käyttökelpoinen myös tutkittaessa sellaisia ilmiöitä, joissa ilmastonmuutoksen aiheuttama vaikutus jää vähäiseksi. Käyttämällä mahdollisimman suurta järkevästi perusteltavissa olevaa muutosarviota on parhaat mahdollisuudet saada heikkokin signaali tilastollisesti merkitseväksi.

5. Monissa tapauksissa 5 % alaskenaario ja 95 % yläskenaario taas saattavat edustaa “liian harvinaisia” tapauksia. Tällaisissa tilanteissa voi olla järkevää käyttää alaskenaariona esimerkiksi 10 % fraktiilia tai alakvartaalia (25 % fraktiili) ja vastaavasti 75 % tai 90 % fraktiilia yläskenaariona. Näitäkin prosenttipisteitä vastaavat lämpötilan ja sademäärän muutosarviot löytyvät liitetaulukosta 10 sekä verkkosivuilla olevista taulukoista.

Esimerkkejä ACCLIM-ilmastoskenaarioiden käytöstä ilmastonmuutoksen vaikutus- ja sopeutumistutkimuksissa antavat mm. *Veijalainen (2008)*, *Peltonen-Sainio et al. (2009)*, *Perrels et al. (2008, 2009)* ja *Laapas (2008)*. Havainnollinen tapa yhdistää lämpötilan ja sademäärän muutosten todennäköisyysennusteet vaikutusten arviointia varten on käyttää ns. vastepintamenetelmää (response surfaces). Tätä vaihtoehtoa ovat käyttäneet *Fronzek et al. (2009)* tarkastellessaan palsasoiden tulevaisuutta muuttuvassa ilmastossa.

5.3 Ilmaston ja sään ääri-ilmiöt

Ilmaston ja sään ääri-ilmiöihin ja niiden muutoksiin varautumisen lähtökohtana on, että tiedämme, missä rajoissa nämä ilmiöt ovat vaihdelleet tähän mennessä ja millaiset ovat niiden toistuvuusajat. Ilmaston ja sään ääri-ilmiöiden analyysit pohjautuvat menneiden vuosikymmenien aikana tehtyihin säähavaintoihin. Säähavaintoja on tehty Suomessa joillakin havaintoasemilla järjestelmällisesti jo 1800-luvulta alkaen. Havaintoja tallennetaan havaintokirjoista tietokoneelle ja työn edistymisen myötä saadaan ääriarvolaskentaan entistä pitempiä havaintoajaksarjoja. Kun havainnoista lasketut kuukauden keskilämpötilat ja sadesummat on talletettu ilmastotietokantaan kaikilta Suomen säähavaintoasemilta koko niiden toiminta-ajalta, niin suurin päivittäisistä, sähköiseen muotoon saatetuista aineistoista alkaa toistaiseksi vasta vuodesta 1961. Nämä runsaan 50 vuoden pituiset ajaksarjat ovat varsin lyhyitä ääri-ilmiöiden analyysin kannalta, mikä asettaa rajoituksia niiden avulla laskettujen ääriarvojen toistuvuusajojen käytölle etenkin, jos käsiteltävinä ovat hyvin harvinaiset, mutta seurauksiltaan ehkä vakavatkin ilmiöt. On ilmeistä, että millään tilastollisella menetelmällä ei voida luotettavasti arvioida sellaisen ilmiön esiintymistodennäköisyyttä, josta toistaiseksi ei ole havaintoa tai joka on esiintynyt vain kerran tai kaksi havaintojakson aikana.

Esimerkkinä havaintoaineiston laajuuden vaikutuksesta toistuvuusajattarkasteluihin mainittakoon Turun ylimmät lämpötilat. Turussa mitattiin v. 1914 vuorokauden ylimmäksi lämpötilaksi peräti 35,9 °C. Jos otamme tämän havainnon mukaan analyysiin, esimerkiksi 50 vuoden toistuvuustason arvio Turussa nousee noin 1,5 asteella verrattuna kuvassa 3d esitettyyn tulokseen, joka perustuu v. 1961 alkaneisiin mittauksiin. Toisaalta voidaan kysyä, kuinka luotettavana kyseistä havaintoarvoa voi pitää, joskin tuolloin mitattiin kovia helteitä myös muualla Etelä- ja Keski-Suomessa.

Tietämys sään ääri-ilmiöiden esiintymisestä ja voimakkuudesta lisääntyy havaintosarjojen pidentyessä sekä alku- että loppupäästään; entistä vanhempia havaintoja saatetaan sähköiseen

muotoon ja tuoreita havaintoja kertyy kaiken aikaa. Toisaalta ilmaston ennakoidaan muuttuvan nopeasti tulevina vuosikymmeninä kasvihuoneilmion voimistumisen seurauksena. Ilmaston muuttuessa myös vuosienvälistä ja päivittäistä vaihtelua kuvaavat todennäköisyysjakaumat muuttuvat. Tämä muutos muuttaa nykyisen havaintoaineiston pohjalta tehtyjen laskelmien tuloksia ainakin lämpötilojen toistuvuusaikojen osalta. Aiemmista havainnoista johdetut jakaumat eivät siis enää sellaisenaan kuvaa nykyistä tai tulevaa ilmastoja. Erityisesti hyvin korkeat lämpötilat, joiden toistuvuus aika aikaisempien havaintojen perusteella on ollut useita satoja vuosia, voivat nykyilmastossa toistua muutaman kymmenen vuoden välein ja tulevaisuudessa vielä useammin. Niinpä viime vuosina sattuneet ennätysellisen lämpimät jaksot (v. 2006 joulukuu, v. 2007 maaliskuu, v. 2007–2008 talvikausi kokonaisuudessaan; v. 2008 koko vuoden korkea keskilämpötila) eivät jo toteutunut ilmastonmuutos huomioiden olekaan mitään tavattoman harvinaisia tilastokummajaisia. Sen sijaan hyvin kylmät talvilämpötilat ovat etenkin Helsingissä käyneet vuosikymmenien mittaan entistä harvinaisimmiksi. Joidenkin ääri-ilmiöiden, erityisesti poikkeuksellisten lämpötilojen toistuvuusaikojen laskettaessa olisi siis jatkossa pyrittävä ottamaan huomioon myös ilmastonmuutosten vaikutus, sillä se on ilmeisesti ollut esimerkiksi viimeaikaisten lauhjojen talvien tulkinnan kannalta varsin tärkeä.

Alueellisia ilmastomallikokeita käytettiin tässä tutkimuksessa vuorokauden minimi- ja maksimilämpötilojen keskiarvojen ja jakaumien, sään vaihtelua luonnehtivien indeksien sekä vuorokauden aluesadannan toistuvuustasojen muutosskenaarioiden laadintaan. Vaikka käytetyt indeksit kuvaavat melko tavanomaisia ilmiöitä eli sellaisia arvoja, jotka ylitetään vuoden, parin välein, voi niille saatuja muutoksia käyttää hyväksi myös arvioitaessa harvemmin sattuvien tapausten esiintymisen trendejä. Kun indeksien muutosskenaariot laaditaan useisiin eri alueellisiin ilmastomalleihin perustuen ja lisäksi vielä otetaan huomioon se, edustavatko nämä mallit laajempaan, maailmanlaajuisten mallien muodostamaan joukkoon verrattuna keskimääräistä, hidasta vai nopeaa ilmastonmuutosta, saadaan vaikutus- ja sopeutumistutkimusten kannalta varsin käyttökelpoisia arvioita luottamusrajoineen. Sen sijaan yksittäisten mallien tulokset etenkin hyvin harvinaisten tapausten toistuvuuksille kärsivät helposti satunnaisen vaihtelun aiheuttamasta hälystä. Tämä kävi ilmi mm. analysoidessamme runsaiden aluesadantojen toistuvuustasojen muutoksia (luku 4.11). Nämä aluesadannat oli laskettu useiden hilaruutujen sademäärästä. Yksittäisissä hilaruuduissa ääri-ilmiöitä koskevat tulokset olisivat helposti vielä hälyisempiä eli sattumasta kiinni.

Mainittakoon lopuksi, että maapallonlaajuisista malleista on käytettävissä myös päivittäistä aineistoa kahdelle 20-vuotisjaksolle, vuosille 2046–2065 ja 2081–2100, ja näitä analysoidaan hankkeen käynnissä olevassa toisessa osassa (ACCLIM II). Tarkoituksena on selvittää mm. tulevia tuulioloja sekä rankkasateiden ja äärevien lämpötilojen esiintymistä. Tosin, kuten aiemmin on todettu, mallien melko karkea alueellinen erotuskyky on tällaisia ääri-ilmiöitä tutkittaessa rajoitteena. Niinpä tuloksia täydennetään tuoreimpien alueellisten ilmastomalliajojen tuloksilla; näitä ajoja on tuotettu eurooppalaisessa ENSEMBLES-hankkeessa.

6 Yhteenveto ja johtopäätökset

Ilmaston vaihteluihin ja muutokseen varautuminen edellyttää mahdollisimman luotettavaa tietoa menneestä, nykyisestä ja tulevasta ilmastosta, sekä sen keskimääräisistä arvoista että vaihteluista ja ääri-ilmiöistä. ACCLIM-hankkeen tehtävänä on vastata Ilmastonmuutoksen sopeutumistutkimusohjelman (ISTO) nykyistä ja tulevaa ilmastoa koskevasta tietopalvelusta. Hankkeessa on päivitetty Suomea koskevat ilmastonmuutosskenaariot IPCC:n 4. arviointiraporttia varten tehtyjen ilmastomallikokeiden tulosten avulla. Samalla on tuotettu entistä kattavampaa tietoa ilmastonmuutoksiin liittyvistä epävarmuustekijöistä, soveltuvin osin todennäköisyysjakaumien muodossa. Hankkeessa on myös laskettu toistuvuusaikatasot luottamusväleiseen joukolle keskeisiä ilmastomuuttujia säähavaintojen pohjalta (*Venäläinen et al., 2007a, 2009*) ja tutkittu esimerkinomaisesti lämpötilojen toistuvuusaikojen muuttumista jo toteutuneen lämpenemisen myötä (*Räisänen ja Ruokolainen, 2008b*).

Vuorovaikutus tutkimusohjelman muiden hankkeiden kanssa on tähdännyt siihen, että toimitettavat ilmastoaineistot vastaavat mahdollisimman hyvin niitä käyttävien tarpeita ja että käyttäjät saavat opastusta ilmastotiedon soveltamisesta omissa sopeutumistutkimuksissaan. Hankkeessa on myös pyritty koordinoimaan sitä, että tutkimusohjelman eri hankkeissa käytettävät räätälöidyt ilmastonmuutosskenaariot vastaavat toisiaan ja että tulosten vertailu on näin mahdollista. Erityisesti on tuotu esiin ilmastomallien tuloksiin vielä liittyvät useat epävarmuustekijät, jotka tulee ottaa huomioon sopeutumistoimia koskevia päätöksiä tehtäessä.

Tulevia ilmastonmuutoksia ei voida ennustaa tarkasti. Pitkällä tähtäimellä suurimpia virhelähteitä ovat ilmastomalleihin ja kasvihuonekaasujen tuleviin päästöihin liittyvät epävarmuudet. Lyhyisiin ilmastoennusteisiin eniten epävarmuutta aiheuttaa kuitenkin ilmaston luonnollinen, vuosien ja vuosikymmenien välinen vaihtelu. Tämän luonnollisen vaihtelun takia ilmastonmuutokset tulevat etenemään ajoittain nopeammin ja ajoittain hitaammin; voipa luonnollinen vaihtelu jopa lyhytaikaisesti kääntää ilmastonmuutoksen suunnan päinvastaiseksikin kuin mitä kasvihuoneilmaston voimistuminen sinällään aiheuttaisi.

Hankkeessa on käytetty kahta menetelmää tulevaisuuden ilmastoa koskevien todennäköisyssennusteiden laatimiseen. Alkaneen vuosisadan alkupuolta varten laaditut lämpötilan ja sademäärän todennäköisyssennusteet ottavat erityisesti huomioon ilmaston luonnollisen vaihtelun. Ennusteet laadittiin erikseen kullekin vuosikymmenelle (esim. v. 2011–2020) pitäen vertailukohtana 1900-luvun lopulla (v. 1971–2000) vallinnutta ilmastoa (*Räisänen ja Ruokolainen 2006; Ruokolainen ja Räisänen 2007*). Mallitulosten perusteella jo tuleva vuosikymmen (2011–2020) on Suomessa vuosisadalla vertailujaksoa lämpimämpi yli 95%:n todennäköisyydellä. Lähestyttäessä vuosisadan puoliväliä (v. 2041–2050) lämpötilan nousua voidaan pitää jo käytännöllisesti katsoen varmana (todennäköisyys > 99%).

Todennäköisyysarvioita on laadittu myös myöhemmin tällä vuosisadalla koettaville ilmastonmuutoksille. Vertailujakso oli näissä ennusteissa sama kuin edellä, mutta ajallinen erottelukyky karkeampi — ennusteita esitettiin 30 vuoden jaksoille (esim. 2070–2099). Tuloksena saatavia todennäköisyysjakauksia on kuitenkin syytä pitää ehdollisina ja pikemmin suuntaa-antavina kuin täsmällisinä. Ne nimittäin lähtevät oletuksesta, että kasvihuonekaasujen tulevat pitoisuudet osuvat niille tässä tutkimuksessa käytetyn kolmen skenaarion muodostamaan haarukkaan ja että myös ilmastojärjestelmän herkkyyttä ilmastonmuutoksen koostumuksen muutoksille voidaan arvioida riittävän hyvin nykyisen ilmastomallijoukon avulla. Ilmastonmuutos ja siten myös sen

suorat vaikutukset ovat kaikissa skenaarioissa lähes samoja noin vuoteen 2040 saakka. Vuosisadan jälkipuoliskolla erot suurimpia ja pienimpiä päästöjä vastaavissa ilmastoskenaarioissa ovat jo huomattavia, ja tämä pyrittiin ottamaan huomioon todennäköisyysarvioita laadittaessa.

Keskilämpötilan ja keskimääräisen sademäärän lisäksi tutkittavana oli koko joukko muita ilmastosuureita, esimerkiksi rankkasateet, poutajaksot, lumipeite, pilvisuus ja auringonsäteily määrä sekä termiset vuodenaajat ja kasvukauden pituus. Laajaa maapallonlaajuisten ilmastomallikokeiden tuottamaa aineistoa on täydennetty alueellisilla ilmastomalleilla tehtyjen tarkentavien laskelmien tuloksilla. Hankkeen tuloksia koskevia yhteenveto on esitetty tämän raportin alussa olevassa laajennetussa tiivistelmässä. Jatkohankkeen (ACCLIM II) tuoreita tuloksia on nähtävissä myös hankkeen kotisivustolla www.fmi.fi/acclim. Siellä on annettu myös ilmastoskenaarioiden valintaa koskevaa ohjeistusta.

Suomessa ilmastomuutoksella arvioidaan olevan moninaisia seurauksia, jotka näkyvät luonnossa ja vaikuttavat moniin yhteiskunnan toimialoihin. Jo nykyisessä, vähitellen väijäämättä muuttuvassa ilmastossa on syytä varautua sään ja ilmaston vaihteluihin ja ääri-ilmiöihin. Sää ja ilmasto asettavat vaatimuksia mm. rakenteiden kestävyydelle, aiheuttavat erilaisia toimintaja liikennöintihäiriöitä, altistavat onnettomuuksille, lisäävät tai vähentävät ylläpitokuluja jne. Kun suunnitellaan uusia järjestelmiä, rakenteita tai toimintatapoja, tulisi arvioida muuttuvien ilmasto- ja sääolosuhteiden mahdolliset vaikutukset niiden turvallisuuteen, toimivuuteen ja taloudellisuuteen.

Rankkasateiden yleistyminen ja routaisuuden muutokset tuovat uusia haasteita esimerkiksi tieinfrastruktuurin suunnittelulle ja tienpidolle. Toisaalta liikenne tuottaa kasvihuonekaasuja, joten liikennettä koskevat ratkaisut vaikuttavat osaltaan maamme kasvihuonekaasupäästöihin. Esimerkki osoittaa, kuinka ilmastomuutokseen sopeutuminen ja sen hillintä nivoutuvat usein yhteen. Yleisesti ottaen ilmastomuutoksen hillintätoimet auttavat sopeutumista, sillä ne hidastavat ja lieventävät ilmaston muuttumista. Hankkeen tuloksia voidaankin hyödyntää sekä ilmastomuutoksen vaikutuksia ja sopeutumistarpeita tutkittaessa että kasvihuoneilmiön voimistumisen hillitsemiseen tähtäävän ilmastopolitiikan taustatietona.

Samalla kun Suomessa sateet lisääntyvät, Etelä- ja kesällä myös Keski-Eurooppa muuttuvat entistä kuivemmiksi. Tämä voi vaikuttaa meihin enemmän kuin konsanaan omien sademääriemme lisääntyminen ja kasvukauden piteneminen. Voidaan ounastella, että ilmastomuutos muuttaa pitkällä tähtäimellä mm. maataloustuotteiden markkinatilannetta ja EU:n maatalouspolitiikkaa.

Ilmastomuutoksesta koituvien haittojen vähentäminen ja sen luomien mahdollisuuksien hyödyntäminen edellyttävät hallittua sopeutumista jo muuttuneisiin ja tulevaisuudessa yhä enemmän muuttuviin olosuhteisiin. Ilmastomuutosta ja sen vaikutuksia koskevissa ennusteissa on väistämättä epävarmuutta. Ennusteisiin sisältyvä epävarmuus voidaan pyrkiä ottamaan huomioon esimerkiksi riskienhallinnan avulla (mm. *Molarius et al., 2008*). Tämä raportti keskittyy kuluvaan vuosisataan, mutta on syytä mainita, että suurimpien päästöjen skenaarioissa äkillisten, peruuttamattomien muutosten (merivirrat, jäätiköiden sulaminen) riski kasvaa seuraavina vuosisatoina. Tällöin ilmastomuutoksen vaikutukset myös Suomessa olisivat tuhoisia.

Ilmastomuutokseen sopeutumista maataloudessa ja elintarviketuotannossa, metsätaloudessa, vesivarojen ja tulvariskien hallinnassa, kaavoittamisessa ja rakentamisessa, kalataloudessa ja

luonnon monimuotoisuuden vaalimisessa sekä sopeutumisen yhteiskunnallisia ja kansainvälisiä ulottuvuuksia tutkitaan ISTO-tutkimusohjelman ja Ympäristöklusterin rahoittamissa muissa hankkeissa. EKOTULI-tutkimusteema puolestaan pyrkii edistämään liikkumisen ekotehokkuutta ja turvallisuutta mm. etsimällä keinoja vähentää tienpidosta aiheutuvaa ympäristön kuormitusta. ACCLIM-hankkeessa tuotettu ilmastotieto yhdessä muiden tutkimushankkeiden tulosten kanssa parantaa edellytyksiämme arvioida sitä, miten laajoja sopeutumistoimia tarvitaan yhteiskunnan eri aloilla ilmaston muuttuessa; tämän rinnalla on luonnollisesti pyrittävä ilmastomuutoksen rajoittamiseen.

Tietoa ilmastosta ja sen muuttumisesta tarvitsevat ilmastomuutoksen vaikutus- ja sopeutumistutkijoiden lisäksi myös viranomaiset ja päätöksentekijät. Tässä raportissa on pyritty esittelemään hankkeen tuloksia erityisesti niiden soveltamista ajatellen. Vaikka käsiteltävänä on ollut koko joukko ilmastosuureita ja työ jatkuu edelleen ACCLIM II -jatkohankkeessa, on ilmeistä, etteivät valitut suureet ja tarkastelujen ajallinen ja alueellinen tarkkuus ole riittäviä kaikkien tiedontarvitsijoiden kannalta. Onkin syytä edelleen tarkentaa ja priorisoida tietotarpeita, jotta tutkimus Suomen muuttuvasta ilmastosta palvelisi mahdollisimman tarkoituksenmukaisesti päätöksentekoa.

Kiitokset

Kiitämme hanketta vuosina 2006–2008 rahoittaneita tahoja, maa- ja metsätalousministeriötä, ympäristöministeriötä, liikenne- ja viestintäministeriötä ja Tiehallintoa. Ministeriöiden rahoitus kanavoitui ISTO-tutkimusohjelman ja Ympäristöklusterin kautta, Tiehallinnon EKOTULI-tutkimusteeman puitteissa. Hankkeen edistymistä tuki myös Suomen Akatemian rahoittama hanke “Climate in the next 50 years”. Lisäksi kiitämme Ilmatieteen laitosta ja Helsingin yliopistoa hankkeen vaatiman omarahoitusosuuden järjestämisestä.

Tutkimuksessa käytetyt maailmanlaajuisten ilmastomallien tuottamat aineistot ovat peräisin kansainvälisestä tietopankista “World Climate Research Program’s (WCRP’s) Coupled Model Intercomparison Project phase 3 (CMIP3) multi-model dataset”. Alueellisten ilmastomallien aineistot on puolestaan saatu eurooppalaisen PRUDENCE-hankkeen (EVK2-CT2001-00132) tietopalvelusta sekä suoraan SMHI:n Rossby-keskuksesta Ruotsista. Näiden malliaineistojen monipuolisuus teki mahdolliseksi arvioida Suomen ilmaston muuttumista aiempaa kattavammalla tavalla.

Dr. Ewan O’Connor on tarkistanut raportin englanninkieliset osuudet. Hänen lisäksi kiitämme Jaakko Forsiusta, joka on ylläpitänyt hankkeen verkkosivustoa ja piirtänyt havaintoihin perustuvia toistuvuustasoja esittävät kartat luvussa 4.1, sekä Achim Drebsiä ja Pentti Piristä avusta havaintojen käsittelyssä.

Kirjallisuusviitteet

- Aaltonen, J., Hohti, H., Jylhä, K., Karvonen, T., Kilpeläinen, T., Koistinen, J., Kotro, J., Kuitunen, T., Ollila, M., Parvio, A., Pulkkinen, S., Silander, J., Tiihonen, T., Tuomenvirta, H. & Vajda, A., 2008. Rankkasateet ja taajamatulvat (RATU). Suomen ympäristö 31/2008, Luonnonvarat, Suomen ympäristökeskus, 123 s.
- Berghäll, J. & Pesu, M., 2008. Ilmastonmuutos ja kulttuuriympäristö – Tunnistetut vaikutukset ja haasteet Suomessa. (Climate Change and the Cultural Environment - Recognized Impacts and Challenges in Finland). Suomen ympäristö 44/2008, Rakennettu ympäristö, s. 34. Ympäristöministeriö. The publication is available also in English.
- Carter, T. R., Posch, M. & Tuomenvirta, H., 1996. The SILMU scenarios: specifying Finland's future climate for use in impact assessment. *Geophysica*, 32(1–2), p. 235–260.
- Carter, T. R., Jylhä, K., Perrels, A., Fronzek, S. & Kankaanpää, S., 2005: FINADAPT scenarios for the 21st century - Alternative futures for considering adaptation to climate change in Finland. FINADAPT working paper 2, Finnish Environment Institute Mimeographs 332, 42 p.
- Carter, T. R., 2007 (ed.). Assessing the adaptive capacity of the Finnish environment and society under a changing climate: FINADAPT. Finnish Environment, 1/2007, 76 pp (in Finnish and English).
- Christensen, J. H., Carter, T. R., Rummukainen, M. & Amanatidis, G., 2007. Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. *Clim. Change 81:Supplement 1*, p. 1–6.
- Coles, S., 2001. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer-Verlag London. 208 p.
- Fortelius, C., Holopainen, E., Kaurola, J., Ruosteenoja, K. & Räisänen, J., 1996. Climate models and scenarios. In: Roos, J. (Ed.), The Finnish Research Programme on Climate Change (SILMU), Final Report, Publications of the Academy of Finland 4/96, p. 43–49.
- Fronzek, S., Carter, T.R., Räisänen, J., Ruokolainen, L. & Luoto, M., 2009. Applying probabilistic projections of climate change with impact models: a case study for sub-arctic palsa mires in Fennoscandia. *Climatic Change*, in press, DOI 10.1007/s10584-009-9679-y
- Gilleland, E., Katz, R. & Young, G., 2005. Extremes toolkit (extRemes): Weather and climate applications of extreme value statistics. Available at <http://www.assessment.ucar.edu/toolkit/>
- Gregow, H., Venäläinen, A., Laine, M., Niinimäki, N., Seitola, T., Tuomenvirta, H., Jylhä, K., Tuomi, T. & Mäkelä, A., 2008a. Vaaraa aiheuttavista sääilmiöistä Suomen muuttuvassa ilmastossa. Ilmatieteen laitos. Raportteja 2008:3, 99 s.
- Gregow, H., Venäläinen, A., Peltola, H., Kellomäki, S. & Schultz, D., 2008b. Temporal and spatial occurrence of strong winds and large snow load amounts in Finland during 1961–2000. *Silva Fennica* 42:4, p. 515–534.
- Heino, R., 1994. Climate in Finland during the period of meteorological observations. Finnish Meteorological Institute Contributions, No. 12, 209 p.
- Holopainen, E., 1973. Ihminen ja ilmaston muutos. Helsingin yliopisto, meteorologian laitos, Raportti, 3, 12 s.
- Holopainen, J., 2004. Turun varhainen ilmastollinen havaintosarja. Ilmatieteen laitos. Raportteja 2004:8, 59 s.

- Holopainen, J., Helama, S., Kajander, J., Korhonen, J., Launiainen, J., Nevanlinna, H., Reissell, A. & Salonen, V.-P., 2009. A multiproxy reconstruction of spring temperatures in south-west Finland since 1750. *Climatic Change* 92, p. 213–233.
- Houghton, R.A., 1999: The annual net flux of carbon to the atmosphere from land use 1850-1990. *Tellus* 51B, 298-313.
- Huovila, S. & Heino, H., 1979. Jääkaudesta ei ole pelkoa - lämpötilan uskotaan nousevan useita asteita vuoteen 2050 mennessä. Helsingin Sanomat, 4.3.1979.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p.
- Jacob, D., Bärring, L., Christensen, O. B., Christensen, J. H., de Castro, M., Déqué, M., Giorgi, F., Hagemann, S., Hirschi, M., Jones, R., Kjellström, E., Lenderink, G., Rockel, B., Sánchez, E., Schär, C., Seneviratne, S. I., Somot, S., van Ulden, A. & van den Hurk, B., 2007. An inter-comparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate. *Clim. Change*, 81:Supplement 1, p. 31–52.
- Jylhä K., H. Tuomenvirta & Ruosteenoja, K., 2004. Climate change projections for Finland during the 21st century. *Boreal Env. Res.* 9, p. 127–152.
- Jylhä, K., Kilpeläinen, T., Venäläinen, A., Saku, S., Tuomenvirta, H., Ruosteenoja K. & Vajda, A., 2007a. Prolonged periods with little rain during summer in Finland - observations and future projections. Extended abstract, 5th Study Conference on BALTEX, 4.–8.6.2007.
- Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Räisänen, P. and Järvenoja S., 2007b. Projected changes in heavy precipitation and snow cover in Finland. Climate change impacts and adaptation in the hydrology of urban areas. Third International Conference on Climate and Water, Helsinki, Finland, 3–6 September 2007. Proceedings, p. 227–232. (<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=169172&lan=en>)
- Jylhä, K., Fronzek, S., Tuomenvirta, H., Carter, T. R. & Ruosteenoja, K., 2008. Changes in frost, snow and Baltic Sea ice by the end of the twenty-first century based on climate model projections for Europe. *Clim. Change*. 86, p. 441–462.
- Karppanen, J., 2006. Climate change in northern Europe based on AR4 climate models: comparison and analysis. Pro gradu, Helsingin yliopisto, fysikaalisten tieteiden laitos, 60 s.
- Karttunen, H., Koistinen, J., Saltikoff, E. & Manner, O., 2008. Ilmakehä, sää ja ilmasto. Ursan julkaisuja 107, 497 s.
- Keeling, C. D. & Whorf, T. P., 2005: Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. In Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- Kilpeläinen, T., Tuomenvirta, H. & Jylhä, K., 2008. Climatological characteristics of summer precipitation in Helsinki during the period 1951–2000. *Boreal Env. Res.* 13, p. 67–80.
- Kjellström, E., Bärring, L., Gollvik, S., Hansson, U., Jones, C., Samuelsson, P., Rummukainen, M., Ullerstig, A., Willén U. & Wyser, K., 2005. A 140-year simulation of European climate with the new version of the Rossby Centre regional atmospheric climate model (RCA3). Reports Meteorology and Climatology 108, SMHI, SE-60176 Norrköping, Sweden, 54 p.
- Kjellström, E. & Ruosteenoja, K., 2007. Present-day and future precipitation in the Baltic Sea region as simulated in a suite of regional climate models. *Clim. Change* 81:Supplement 1, p. 281–291.

- Laapas, M., 2008. Puutarhakasvien talvehtiminen Manner-Suomen ilmastossa nyt ja tulevaisuudessa. Pro gradu. Helsingin yliopisto, matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta, fysiikan laitos, ilmakehätieteiden ja geofysiikan osasto, 62 s. (<http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe200806121549>)
- Marland, G., T.A. Boden & Andres, R. J., 2005. Global, regional, and national fossil fuel CO₂ emissions. In Trends: A Compendium of data on global change. Carbon Dioxide Information Analysis center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- Meehl, G. A., C. Covey, T. Delworth, M. Latif, B. McAvaney, J. F. B. Mitchell, R. J. Stouffer & Taylor, K. E., 2007. The WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: A New Era in Climate Change Research. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 88, p. 1383–1394.
- Merenkulkulaitos, 2009. Ilmastomuutoksen vaikutukset Merenkulkulaitoksen toimintaan ja ilmastomuutokseen sopeutumisen edellyttämät toimenpiteet. Merenkulkulaitoksen sisäisiä julkaisuja 3/2009, 49 s.
- Molarius, R., Wessberg, N., Keränen, J. & Schabel, J., 2008. Creating a climate change risk assessment procedure hydropower plant case, Finland. XXV Nordic Hydrological Conference 2008, August 11–13, 2008, Iceland. Nordic Hydrological Programme, NHP Report No. 50. Reykjavik., 597–606. (Saatavissa verkko-osoitteesta http://www.vannetinorden.com/documents/nhc2008_vol2.pdf)
- Nevanlinna, H. (toim.) 2008. Muutamme ilmastoa. Karttakeskus, 237 s.
- Niskanen, A., Donner-Amnell, J., Häyrynen, S. & Peltola, T., 2008. Metsän uusi aika - kohti monipuolisempaa metsäalan elinkeinorakennetta. *Silva Carelica* 53, 272 s.
- Peltonen-Sainio, P., Hakala, K., Jauhiainen, L. & Ruosteenoja, K., 2009: Comparing regional risks in producing turnip rape and oilseed rape - Impacts of climate change and breeding. *Acta agriculturae Scandinavica* 59B:2, 129–138. doi:10.1080/09064710802022895
- Perrels, A., Tuovinen, T., Veijalainen, N. & Jylhä, K., 2008. Evaluating economic risks of extreme weather events from costs to resilience. *Futura* 4/08, p. 73-86.
- Perrels, A., Veijalainen, N., Jylhä, K., Aaltonen, J., Molarius, R., Porthin, M., Silander, R., Rosqvist, T. & Tuovinen, T., 2009. The Implications of Climate Change for Extreme Weather Events and their Socio-economic Consequences in Finland, VATT Research, Helsinki. (painossa)
- Persson, G., Barring, L., Kjellström, E., Strandberg G. & Rummukainen, M., 2007. Climate indices for vulnerability assessments. Reports Meteorology and Climatology 111, SMHI, SE-60176 Norrköping, Sweden, 64 p.
- Pimenoff, N., Venäläinen, A., Pilli-Sihvola, K., Tuomenvirta, H., Järvinen, H., Ruosteenoja, K., Haapala, J. & Räisänen, J., 2008. Epälineaariset ja äärimmäiset ilmaston muutokset, Valtioneuvoston kanslian julkaisusarja, 14/2008, 61 s.
- Rasmus, S., Räisänen, J. & Lehning, M., 2004. Estimating snow conditions in Finland in the late 21st century using the SNOWPACK model with regional climate scenario data as input. *Annal Glaciol* 38, p. 238–244.
- Rinne, J. 1976. Helsingin Sanomat, 16.9.1976. Viittaus: Aamulehti Sunnuntai, 20.5.2007 (http://www.aamulehti.fi/sunnuntai/teema/asiat_paajutut/4938143.shtml).
- Rinne, J., Koistinen, J. & Saltikoff, E. (toim.), 2008. Suomalainen sääopas. Otava, 248 s.
- Ruokolainen, L. & Räisänen, J., 2007. Probabilistic forecasts of near-term climate change: sensitivity to adjustment of simulated variability and choice of baseline period. *Tellus* 59A, p. 309–320.

- Ruosteenoja, K., Jylhä, K. & Tuomenvirta, H., 2005. Climate scenarios for FINADAPT studies of climate change adaptation. FINADAPT Working Paper 15, Finnish Environment Institute Mimeographs 345, Helsinki, 38 p.
- Ruosteenoja, K., Tuomenvirta, H. and, Jylhä, K., 2007: GCM-based regional temperature and precipitation change estimates for Europe under four SRES scenarios applying a super-ensemble pattern-scaling method. *Clim. Change 81:Supplement 1*, p. 193–208.
- Ruosteenoja, K., Räisänen, J. & Pirinen, P., 2009. Projected changes in thermal seasons and the growing season in Finland. (Valmisteilla oleva käsikirjoitus)
- Räisänen, J., 2008. Warmer climate: less or more snow? *Climate Dynamics 30*, p. 307–319.
- Räisänen, J. & Ruokolainen, L., 2006. Probabilistic forecasts of near-term climate change based on a resampling ensemble technique. *Tellus 58A*, p. 461–472.
- Räisänen, J. & Ruokolainen, L., 2008a. Estimating present climate in a warming world: a model-based approach. *Climate Dynamics 31*, p. 573–585.
- Räisänen, J. & Ruokolainen, L., 2008b. Ongoing global warming and local warm extremes: a case study of winter 2006–2007 in Helsinki, Finland. *Geophysica 44*, p. 43–63.
- Soini, S., 2007. Ilmastonmuutos ja siihen varautuminen Espoossa. Espoon ympäristökeskus Monistesarja 2/2007, 49 s.
- Solantie, R., 2000. Snow depth on January 15th and March 15th in Finland 1919–98 and its implications for soil frost and forest ecology. Finnish meteorological Institute, Meteorological publications, 42, 176 p.
- Solantie, R., 2001: Suomen ilmaston erityispiirteitä. Tieteessä tapahtuu, 3/01, s. 28–31. (<http://www.tsv.fi/ttapaht/013/solantie.htm>).
- Solantie, R. & Pirinen, P., 2006. Orografian huomioiminen loka-huhtikuun sademäärien alueellisissa analyyseissä. Ilmatieteen laitos. Raportteja 2006:4, 35 s.
- Solantie, R., Järvenoja, S. & Pirinen, P., 2007. Keskimääräisten kuukauden minimilämpötilojen alueellinen jakauma kautena 1991–2005 Suomessa sekä muutos kaudesta 1961–1990. Ilmatieteen laitos. Raportteja 2007:1, 59 s.
- Stephenson, A. & Gilleland, E., 2006. Software for the Analysis of Extreme Events: The Current State and Future Directions. *Extremes 8*, p. 87–109.
- Tiehallinto, 2009. Ilmastonmuutoksen vaikutus tiestön hoitoon ja ylläpitoon. Tiehallinnon selvityksiä 8/2009, 66 s. + liitt. 8 s.
- Tietäväinen, H., Tuomenvirta, H. & Venäläinen, A., 2009. Annual and seasonal mean temperatures in Finland during the last 160 years based on gridded temperature data. Submitted to *International Journal of Climatology*.
- Tuomenvirta, H., 2004. Reliable estimation of climatic variations in Finland. Finnish Meteorological Institute Contributions, No. 43, 80 p. + 78 p. append.
- Veijalainen, N., 2008. Climate change effects on water resources and regulation in eastern Finland. XXV Nordic Hydrological Conference 2008, August 11–13, 2008, Iceland. Nordic Hydrological Programme, NHP Report No. 50. Reykjavik., 646–654. (Saatavissa verkkoosoitteesta http://www.vannetinorden.com/documents/nhc2008_vol2.pdf)

Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Pirinen, P. & Drebs, A., 2005. A basic climate data set 1961–2000 - description and illustrations. Finnish Meteorological Institute, Reports, 2005:5, 27 p.

Venäläinen, A., Saku, S., Kilpeläinen, T., Jylhä, K., Tuomenvirta, H., Vajda, A., Ruosteenoja, K. & Räisänen, J., 2007a. Sään ääri-ilmiöistä Suomessa (Aspects about climate extremes in Finland). Ilmatieteen laitos. Raportteja 2007: 4, 81 s. (In Finnish with abstract in English).

Venäläinen, A., Vajda, A., Saku, S., Jylhä, K., Kilpeläinen, T., Tuomenvirta, H. & Helminen, J., 2007b. Drought and extreme precipitation in Finland. Third International Conference on Climate and Water, Helsinki, Finland, 3–6 September 2007. Proceedings, p. 512–517.

Venäläinen, A., Jylhä, K., Kilpeläinen, T., Saku, S., Tuomenvirta, H., Vajda, A. & Ruosteenoja, K., 2009. Recurrence of heavy precipitation, dry spells and deep snow cover in Finland based on observations. *Boreal Env. Res.* 14, p. 166–172.

Liite 2: Tutkimuksessa käytetyt maapallonlaajuiset ilmastomallit

Tutkimuksessa käytetyt maailmanlaajuiset ilmastomuutosmallit sekä niiden alkuperämaa ja laskentahilapisteikkö on esitetty taulukossa 6. Tarkempaa tietoa malleista kirjallisuusviitteeseen on esitetty *IPCC:n (2007)* taulukossa 8.1.

Taulukon 6 yhteensä 22 mallista kolmea (merkitty tähdellä) käytettiin ainoastaan laadittaessa lähivuosisikymmenien ilmastoskenaarioita uudelleenotantamenetelmän avulla. Näissä kolmessa mallissa joko Suomen simuloitu nykyinen ilmasto poikkesi huomattavasti havaitusta, maan ja meren jakauma oli epärealistinen tai mallikokeita oli tehty vain yhdellä SRES-skenaariolla. Huomattakoon myös, että näistä epäilyttävistä malleista kahdessa laskentatarkkuuskin on joko vaaka- tai pystysuunnassa joukon huonoin. Lumipeitteen muutoksia tutkittaessa jouduttiin jättämään vielä pois kaksi muuta mallia, koska toisesta (NCAR-PCM) lumitiedot puuttuivat kokonaan, toisella (GISS-ER) ne olivat täysin epärealistisia.

Kaikki tarjolla olleet mallit eivät ole toisistaan riippumattomia, vaan mukana on samojen tutkimuskeskusten mallien eri versioita. Seulotussa 19 mallin otoksessa ei kuitenkaan enää ollut mukana miltään tutkimuskeskukselta enempää kuin kaksi malliversiota.

Taulukko 6: Tutkimuksessa käytetyt maapallonlaajuiset ilmastomallit. Erotuskyky kertoo hilapisteiden vaakasuuntaisen välimatkan mallissa leveys- ja pituusasteina; kuta pienempi hilaväli, sitä parempi laskentatarkkuus. Viimeisen sarakkeen luku ilmaisee mallin ilmakehäosan laskentatasojen määrän; mitä enemmän tasoja, sen parempi laskentatarkkuus pystysuunnassa. Tähdellä merkityt malleja käytettiin ainoastaan laadittaessa lähivuosisikymmenien ilmastoskenaarioita uudelleenotantamenetelmän avulla.

Malli	Alkuperämaa	Erotuskyky	Tasojen lkm.
BCCR-BCM2.0	Norja	1.9 x 1.9	31
CGCM3.1(T47)	Kanada	2.8 x 2.8	31
CGCM3.1(T63)	Kanada	1.9 x 1.9	31
CNRM-CM3	Ranska	1.9 x 1.9	45
CSIRO-MK3.0	Australia	1.9 x 1.9	18
ECHAM5/MPI-OM	Saksa	1.9 x 1.9	31
ECHO-G	Etelä-Korea/Saksa	3.9 x 3.9	19
FGOALS-g1.0 (*)	Kiina	2.8 x 2.8	26
GFDL-CM2.0	Yhdysvallat	2.0 x 2.5	24
GFDL-CM2.1	Yhdysvallat	2.0 x 2.5	24
GISS-AOM (*)	Yhdysvallat	3.0 x 4.0	12
GISS-EH (*)	Yhdysvallat	4.0 x 5.0	20
GISS-ER	Yhdysvallat	4.0 x 5.0	20
INM-CM3.0	Venäjä	4.0 x 5.0	21
IPSL-CM4	Ranska	2.5 x 3.75	19
MIROC3.2(HIRES)	Japani	1.1 x 1.1	56
MIROC3.2(MEDRES)	Japani	2.8 x 2.8	20
MRI-CGCM2.3.2	Japani	2.8 x 2.8	30
NCAR-CCSM3	Yhdysvallat	1.4 x 1.4	26
NCAR-PCM	Yhdysvallat	2.8 x 2.8	26
UKMO-HadCM3	Iso-Britannia	2.5 x 3.75	19
UKMO-HadGEM1	Iso-Britannia	1.3 x 1.9	38

Liite 3: Tutkimuksessa käytetyt alueelliset ilmastomallit

Taulukon 7 alueelliset ilmastomallit osallistuivat vasta myöhemmin kehitettyä RCA3-mallia lukuunottamatta PRUDENCE-hankkeeseen, josta on kerrottu mm. *IPCC:n (2007)* tietolaatikossa 11.2. Nämä mallikokeet simuloivat 30-vuotisjaksojen 1961–1990 ja 2071–2100 ilmastoja. Tarkastelumme otettiin mukaan myös kolme RCA3-mallilla tehtyä koko 140-vuotisen ajanjakson 1961–2100 kattavaa simulaatiota. Tätä mallia ja sillä saatuja tuloksia ovat kuvanneet mm. *Kjellström et al. (2005)* ja *Persson et al. (2007)*. Useimmat kokoelmamme mallikokeet tarkentavat brittiläisen HadAM3H/HadCM3-mallitusjärjestelmän tuloksia A2-päästöskenaariolle, muutamia myös tuon mallin B2-ajoa. Lisäksi mukana on muutama saksalaisen ECHAM4/OPYC4-mallin A2- ja B2-simulaatioiden alueellinen tarkennus ja yksi ECHAM5/MPI-OM-mallin A1B-simulaation tarkennus.

Kokoelmaan kuuluvan REMO-mallin tulokset kesän ja syksyn sadesuureille on jätetty huomiotta. Myöskään muiden alueellisten mallien simuloimia sadeindeksien muutoksia ei otettu huomioon lähellä rannikkoa. Syynä on HadAM3H/HadCM3-systeemistä peräisin oleva epärealistisen suuri lämpötilan ja sademäärän kasvu Itämeren yllä lämpimään vuodenaikaan. REMO-mallin tuloksiin tämä vaikutti erityisen paljon, sillä se oletti myös järvien lämpenevän kohtuuttoman paljon, mikä johti kesäsateiden huomattavaan voimistumiseen Laatokan ympäristössä ja järvi-Suomessa (*Kjellström ja Ruosteenoja, 2007*). Lukuunottamatta oman merimallinsa sisältävää RCAO-mallia ja sen Itämeri-tuloksia hyödyntävää RACMO-mallia, vaikutus ilmeni muissakin malleissa etenkin maamme länsirannikolla.

Taulukko 7: Tutkimuksessa käytetyt alueelliset ilmastomallit. Kolmas sarake kertoo reuna-arvotiedot antavan maapallonlaajuuden mallin, ja neljäs sarake ilmaisee päästöskenaarion sekä suluissa rinnakkaisajojen määrän, milloin niitä oli käytettävissä.

Malli	Alkuperämaa	Reunamalli	SRES-skenaario
CHRM	Sveitsi	H	A2
CLM	Saksa	H	A2
HadRM3H ¹	Iso-Britannia	H	A2
HadRM3P ¹	Iso-Britannia	HP	A2(3), B2
HIRHAM(dk) ²	Tanska	H	A2(3)
HIRHAM(dk) ³	Tanska	E4'	A2, B2
HIRHAM(no) ⁴	Norja	H	A2, B2
RACMO2	Alankomaat	H	A2
RCAO	Ruotsi	H	A2, B2
RCAO	Ruotsi	E4	A2, B2
RCA3	Ruotsi	E4	A2, B2
RCA3 ⁵	Ruotsi	E5	A1B
REMO ⁶	Saksa	H	A2

Kolmannen sarakkeen lyhenteet:

H tarkoittaa HadAM3H/HadCM3- ja HP HadAM3P/HadCM3-mallitusjärjestelmää,

E4 ja E4' tarkoittavat ECHAM4/OPYC3-mallin kahta rinnakkaisajoa,

E5 tarkoittaa ECHAM5/MPI-OM -mallia.

Ensimmäisen sarakkeen yläindeksit:

¹ Ei saatavissa lumipeitesuureita.

² Mallikeskiarvoja esittävien karttojen laatimiseen käytettiin vain yhden rinnakkaisajon tuloksia.

³ Ei saatavissa minimi- eikä maksimilämpötiloja niistä määräytyvine indekseineen.

⁴ Norjalaisten HIRHAM-simulaatiota ei käytetty mallikeskiarvoja esittävien karttojen laatimiseen.

⁵ Käytettiin yksinomaan ylimpien ja alimpien lämpötilojen jakaumien tutkimiseen.

⁶ Sadesuureita kesälle ja syksyille ei käytetty.

Liite 4: Ääriarvojen analysoinnista

Ääriarvojakaumien teoriaan perustuva tilastollinen analyysi on ollut kehitteillä jo 1900-luvun alkupuolelta lähtien. Tilastollisen analysoinnin kulmakivi on yleinen ääriarvojakauma (GEV-jakauma), jonka erikoistapauksina saadaan kolme ”hännältään” eri tavoin käyttäytyvää jakaumaa (Gumbel, Frechet ja käänteinen Weibull). Ääriarvojen analysoinnin perusmenetelmässä tarkastellaan aineiston jokaiselta tietyltä aikaväliltä, esimerkiksi jokaiselta vuodelta, poimitua itseisarvoltaan suurinta arvoa. Poimitut arvot, joiden oletetaan olevan riippumattomia ja samoin jakautuneita, muodostavat jakauman, joka noudattaa GEV-jakaumaa. Ääriarvojakauma määräytyy sijanti-, skaala- ja muotoparametrien mukaan. Perusmenetelmän heikkoutena on, että se ei usein hyödynnä tehokkaasti käytettävissä olevaa aineistoa. Ns. ”Peaks over threshold” eli POT-menetelmässä kaikki havaintoaineistosta löytyvät äärevät arvot sovitetaan ääriarvojakaumaan. POT-menetelmä perustuu tietyn kynnsarvon ylittävistä arvoista muodostettuun yleistettyyn Pareto -jakaumaan (GPD), joka sekin määräytyy sijainti-, skaala- ja muotoparametrien mukaan.

Tässä raportissa esitetyt toistuvuustasot (lukuunottamatta lukua 4.14) on laskettu The Extremes Toolkit -ohjelmatyökalun avulla, joka on kehitetty Yhdysvalloissa National Center of Atmospheric Research (NCAR) -instituutissa (*Gilleland et al., 2005*). Ohjelmatyökalu sisältää sekä GEV- että GPD-jakaumien pohjalle kehitetyt ääriarvoanalyysit ja toistuvuusaikojen laskentamenetelmät.

Suurin osa analyyseistä tehtiin GPD-jakaumaan pohjautuen. Muutamissa tilanteissa, joissa GPD-jakauman sovittaminen aineistoon ei onnistunut, käytettiin GEV-jakaumaa. GPD-jakaumaa käytettäessä valitaan kynnsarvo, jonka ylittäviin havaintoarvoihin jakauma sovitetaan. Kynnsarvon valinta vaikuttaa suuresti analyyysin tuloksiin. Liian korkea kynnsarvo leikkaa pois ison osan havaintoaineistosta, mikä johtaa suureen hajontaan ja toistuvuusaikarvion virherajojen kasvamiseen suureksi. Toisaalta liian alhaisen kynnsarvon valinta, eli liian suuren havaintojoukon käyttö, aiheuttaa systemaattista virhettä (*Coles, 2001*).

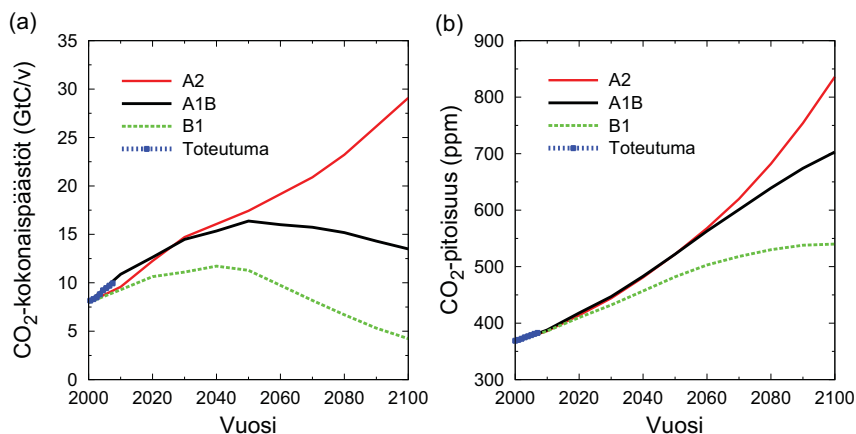
Kynnsarvon valinnassa on käytetty apuna ohjelmatyökaluun sisältyvää graafista työkalua. Sillä voidaan kuvata tilastollisten estimaattien hajonnan riippuvuutta kynnsarvosta. Toisaalta kynnsarvon valinnassa on myös jouduttu käyttämään menetelmää, jossa tehdään GPD-sovitteita useilla eri kynnsarvoilla, ja näistä sitten valitaan se kynnsarvo, joka antaa edustavimman sovituksen. Kynnsarvot on valittu mahdollisimman korkeaksi, mutta kuitenkin ottaen huomioon sen, että toistuvuusaikoja vastaavien arvojen hajonta (= 95 %:n luottamusväli) ei muodostuisi liian suureksi. Nämä luottamusvälit määritettiin ns. profiili-log-uskottavuusfunktioon perustuen.

Luvussa 4.14 käytetään liitteessä 7 kuvattua menetelmää kuukauden keskilämpötilojen esiintymisen todennäköisyysjakauman määrittämiseen nykyisessä, jo lämmenneessä ilmastossa. Yksinomaan havaintoihin perustuvat arviot siitä, miten vuoden alimpien lämpötilojen toistuvuustasot ovat muuttuneet ajan mukana, on puolestaan tehty ns. evd-paketilla. Se rakentuu R-ohjelmointikielisen ismev-paketin pohjalle, samoin kuin tekee edellä mainitun The Extremes Toolkit -ohjelmatyökalun käyttämä extRemes-paketti (*Stephenson ja Gilleland, 2006*).

Liite 5: Kasvihuonekaasujen ja pienhiukkasten päästö- ja pitoisuus-skenaariot

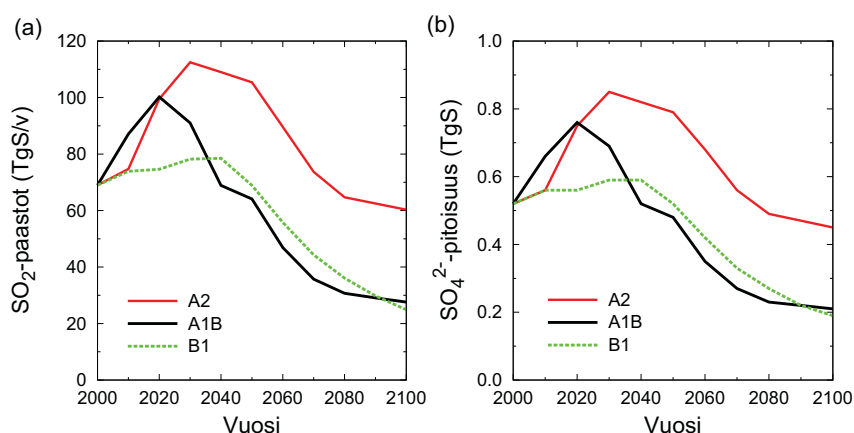
Ihmiskunnan tuottamista kasvihuonekaasuista hiilidioksidi on tärkeämpi kuin kaikki muut kaasut yhteensä. Ennen teollistumisen aikaa CO₂:n pitoisuus ilmakehässä oli n. 280 ppm, nykyisin jo n. 380 ppm (ppm = tilavuuden miljoonasosa). Tulevaisuudessa hiilidioksidipitoisuus kasvaa edelleen, kun taas ilmastoa viilentävien pienhiukkasten määrä ilmakehässä pidemmällä tähtäimellä vähenee. Kuvassa 32 on esitetty hiilidioksidin päästöjen ja pitoisuuden toteutunut²¹ ja arvioitu kehitys tällä vuosisadalla kolmen SRES-skenaarion perusteella, ja kuvassa 33 on näytetty rikkidioksidin päästöjen ja niistä muodostuvien sulfaattihiukkasten pitoisuuksien vastaavat kehityskulut. Eri päästöskenaariot poikkeavat toisistaan mm. väestönkasvun, tekniikan kehityksen ja ympäristönsuojeluun panostamisen suhteen. Skenaarioista on kerrottu IPCC-raportin (2007) yhteenvedon lopussa olevassa liitteessä, jonka suomenkielinen versio on luettavissa verkossa (http://www.fmi.fi/ilmastonmuutos/ipcc_3.html).

Varsinkin vuosisadan loppupuolella hiilidioksidin määrän kasvu 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 nopeana vuoden 2100 jälkeenkin.



Kuva 32: (a) Hiilidioksidin päästöjen ja (b) pitoisuuden (oikea kuva) arvioitu ajallinen kehitys kolmen SRES-skenaarion mukaan. Lisäksi on näytetty kaasujen havaitut päästöt ja pitoisuudet v. 2000–2007. Kuva perustuu IPCC:n (2001) esittämiin numeroarvoihin ja havaintojen osalta (a) East Anglian yliopiston sekä (b) NOAA/ESRL:n verkkosivuillaan antamiin lukemiin²².

²¹ Toteutuneet hiilidioksidin kokonaispäästöt: http://lmacweb.env.uea.ac.uk/lequere/co2/carbon_budget.htm (lisätietoja: *Marland et al. (2005)* ja *Houghton (1999)*). Mitatut hiilidioksidipitoisuudet: Earth System Research Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA/ESRL), ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2_annmean_gl.txt (lisätietoja: *Keeling and Whorf (2005)*).



Kuva 33: (a) Rikkidioksidin päästöjen ja (b) sulfaattihiukkasten pitoisuuden (oikea kuva) arvioitu ajallinen kehitys kolmen SRES-skenaarion mukaan. Kuva perustuu IPCC:n 3. arviointiraportissa esitettyihin numeroarvoihin (IPCC, 2001).

Liite 6: Lämpötilan ja sademäärän lähivuosisikymmenien keskiarvoja koskevien todennäköisyysennusteiden laadinta

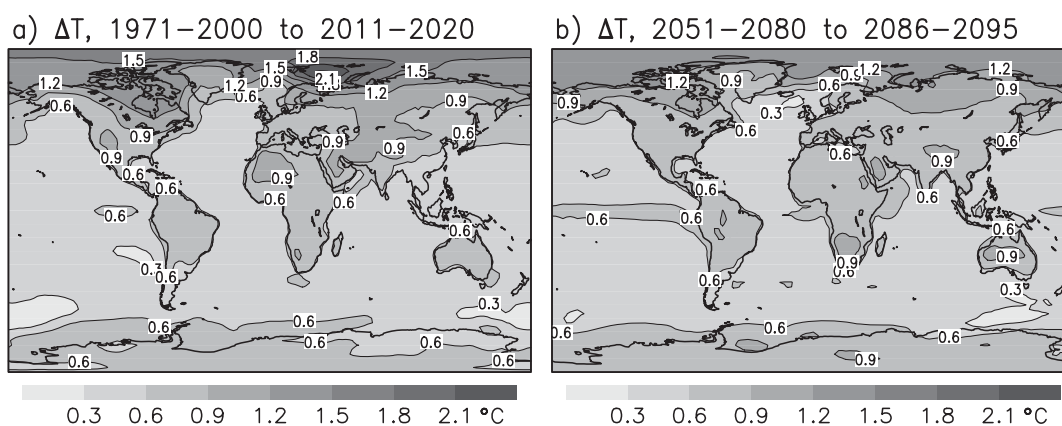
Luonnossa havaittavien ilmastomuutosten voidaan ajatella koostuvan kahdesta osasta. Toisaalta ihmiskunnan aiheuttama kasvihuoneilmiön voimistuminen muuttaa ilmastoa vähitellen, lämpimämpään ja Pohjois-Euroopassa ilmeisesti myös sateisempaan suuntaan. Toisaalta ilmasto vaihtelee myös luonnollisista syistä vuodesta ja vuosikymmenestä toiseen. Tämä luonnollinen vaihtelu voi ajoittain nopeuttaa ja ajoittain hidastaa ilmaston lämpenemistä ja sademäärien kasvua, voipa se tilapäisesti kääntää muutokset päinvastaisiksi (jolloin hätäisimmät jo uskovat ilmastomuutosten pysähtyneen!).

Ilmastomuutoksen todennäköisyysennusteita laadittaessa on siis otettava huomioon sekä kasvihuoneilmiön voimistumisen aiheuttamien vähittäisten ”pakotettujen” muutosten epävarmuus että ilmaston luonnolliseen vaihteluun liittyvä epävarmuus. Ensin mainittu epävarmuus jakautuu kahteen osaan: toisaalta eri ilmastomallit reagoivat samansuuruiseenkin kasvihuonekaasujen lisääntymiseen jossain määrin eri tavoin (malliepävarmuus), toisaalta taas muutosten suuruus riippuu siitä, kuinka paljon kasvihuonekaasuja ilmakehään lisätään (skenaarioepävarmuus). Koska eri kasvihuonekaasuskenaarioita vastaavat arviot ilmastomuutoksen nopeudesta eroavat merkittävästi toisistaan vasta noin vuodesta 2040 alkaen (kuva 10), skenaarioepävarmuudella ei kuitenkaan ole suurta merkitystä vielä lähivuosisikymmeninä. Siksi tyydyimme lähitulevaisuuden ilmastoa koskevia todennäköisyysennusteita laatiessamme vain yhdelle päästöskenaariolle (SRES A1B) tehtyjen mallisimulaatioiden käyttöön. CMIP3-tietokannassa on tämän skenaarion simulaatioita 22 maailmanlaajuiselle ilmastomallille (taulukko liitteessä 2).

Luonnollista ilmastovaihtelua esiintyy myös ilmastomallisimulaatioissa. Kuten todellisella maapallolla, tämä vaihtelu on paljolti satunnaista. Esimerkiksi eri mallien simuloimat tavallista lämpimämmät tai kylmemmät jaksot eivät siis välttämättä osu samoihin vuosiin tai vuosikymmeniin. Kun verrataan eri mallisimulaatioiden antamia ilmastomuutoksia kahden jakson välillä (esim. keskilämpötilan ero vuosien 1971-2000 ja 2011-2020 välillä), eroa näihin

muutoksiin aiheuttavat siis sekä ilmastomallien erilaisuus että eri mallien simulaatioissa “eri vaiheessa” oleva luonnollinen vaihtelu. Niinpä eri malleilla tehtyjen simulaatioiden perusteella voidaankin periaatteessa suoraan arvioida todennäköisyysjakauma sille, millaisia muutoksia kasvihuoneilmiön voimistuminen ja ilmaston luonnollinen vaihtelu yhdessä voisivat aiheuttaa.

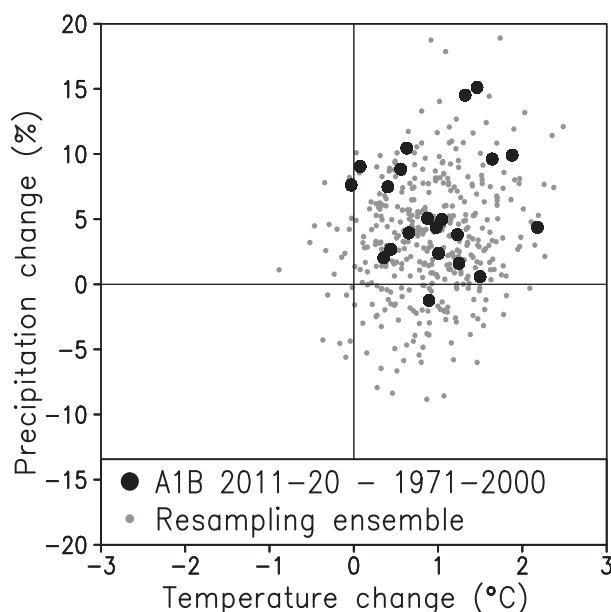
Koska malleja on saatavilla vain rajallinen määrä, näin saatavat todennäköisyysarviot ovat kuitenkin epätarkkoja. Lähivuosisikymmenien ilmaston todennäköisyysennusteita laadittaessa otosta kasvatettiin *Räisäsen ja Ruokolaisen (2006)* kehittämää uudelleenotantamenetelmää käyttäen. Menetelmä perustuu siihen havaintoon, ettei ilmastomallien simuloima ilmastonmuutosten alueellinen jakauma suuresti muutu ajan funktiona, kunhan vaan luonnollisen vaihtelun vaikutus saadaan kutistettua pieneksi ottamalla keskiarvo riittävän monen mallin tuloksista. Kuvassa 34 nähdään CMIP3-mallien simuloima keskimääräinen lämpötilan muutos toisaalta vuosien 1971–2000 ja 2011–2020 välillä, toisaalta vuosien 2051–2080 ja 2086–2095 välillä. Kaksi jälkimmäistä jaksoa on tässä valittu siten, että maapallon keskilämpötilan muutoksen kaikkien mallien keskiarvo on niiden välillä sama kuin varsinaisesti kiinnostuksemme kohteena olevien kahden aikaisemman jakson välillä (eli $0,62^{\circ}\text{C}$). Myös lämpötilamuutosten alueellinen jakauma on varsin samanlainen. Vaikka erojakin toki on nähtävissä, ne ovat kuitenkin pieniä eri mallien tulosten väliseen vaihteluun verrattuna. Tämän perusteella voidaan edelleen olettaa, että vuosien 2051–2080 ja 2086–2095 väliset simuloitut ilmastonmuutokset noudattavat lähes samaa todennäköisyysjakaumaa kuin vuosien 1971–2000 ja 2011–2020 väliset muutokset.



Kuva 34: Ilmastomallien simuloima keskimääräinen vuosikeskilämpötilan muutos (a) vuosien 1971–2000 ja 2011–2020 välillä ja (b) vuosien 2051–2080 ja 2086–2095 välillä (*Räisänen ja Ruokolainen 2006*). Maapallon keskilämpötilan muutos on molemmissa tapauksissa $0,62^{\circ}\text{C}$.

Nykyisen vertailukauden (1971–2000) ja ensi vuosikymmenen (2011–2020) välisten ilmastonmuutosten todennäköisyysjakauman laskemista varten poimimme siis CMIP3-simulaatioista kaikki sellaiset jaksoparit, joiden välinen kaikkien mallien tulosten keskiarvona saatu muutos maapallon keskilämpötilalle oli riittävän lähellä edellä mainittua arvoa $0,62^{\circ}\text{C}$. Edellä mainitut kaksi jaksoparia (1971–2000, 2011–2020) ja (2051–2080, 2086–2095) mukaanlukien tällaisia pareja löytyi yhteensä 20 kappaletta, kun vaadittiin, että eri parien on erottava toisistaan ajallisesti vähintään viidellä vuodella. Samaa periaatetta käytettiin myös muiden vuosikymmenien lämpötila- ja sade-ennusteita laadittaessa.

Kuvassa 35 nähdään esimerkki menetelmän tuottamista tuloksista. Mustat pallukat edustavat eri mallien simuloimia muutoksia Etelä-Suomen (60°N , 25°E) keskilämpötilassa ja sademäärässä vuosien 1971–2000 ja 2011–2020 välillä. Harmaiden pisteiden parvi on taas saatu edellä kuvattua uudelleenotantamenetelmää käyttäen. Koska tämän parven pisteiden määrä on paljon mustien pallukoiden lukumäärää suurempi, sen avulla voidaan arvioida ilmastonmuutosten todennäköisyysjakaumia luotettavammin kuin mitä ilman uudelleenotantaa olisi mahdollista (Räisänen ja Ruokolainen, 2006).



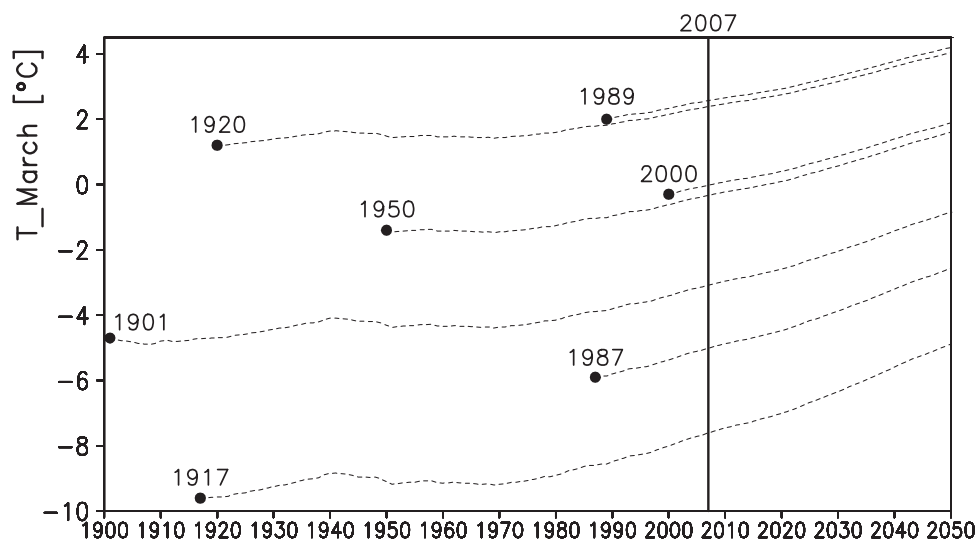
Kuva 35: Lämpötilan (vaaka-akseli) ja sademäärän (pystyakseli) mahdollisia muutoksia Etelä-Suomessa (60°N , 25°E) vuosien 1971–2000 ja 2011–2020 välillä. Mustat pallukat kuvaavat muutoksia, jotka on saatu mallisimulaatioista suoraan mainittujen kahden jakson lämpötiloja ja sademääriä vertailtaessa. Harmaat pisteet kuvaavat uudelleenotantamenetelmän löytämien muiden vertailukelpoisten jaksoparien välisiä lämpötilan ja sademäärän muutoksia (Räisänen ja Ruokolainen, 2006).

Yksi mahdollinen virhelähde edellä kuvatussa menetelmässä on se, ettei ilmaston luonnollinen vaihtelu ole välttämättä malleissa tarkalleen yhtä voimakasta kuin todellisuudessa. Jos mallit esimerkiksi aliarvioivat jonkin ilmastosuureen luonnollista vaihtelua, tämä pyrkii tekemään ko. suureen muutoksille lasketusta todennäköisyysjakaumasta liian kapean. Tämän vuoksi laskelmissa käytettiin myös ns. varianssikorjausta, joka leventää (kaventaa) laskettuja todennäköisyysjakaumia siellä, missä mallit näyttävät aliarvioivan (yliarvioivan) ilmaston vaihtelevuutta. Korjauksen toteutusta kuvataan tarkemmin *Ruokolaisen ja Räisäsen (2007)* artikkelissa.

Liite 7: Ilmaston vuosienvälistä vaihtelua kuvaavien todennäköisyysjakaumien arviointi

Sääolot vaihtelevat vuodesta toiseen. Tämän vaihtelun luonnetta on perinteisesti arvioitu yksinomaan aiempien havaintojen perusteella. Ilmaston muuttuessa kuitenkin myös vuosienvälistä vaihtelua kuvaavat todennäköisyysjakaumat muuttuvat. Aiemmistä havainnoista johdetut jakaumat eivät siksi enää sellaisenaan kuvaa nykyistä tai tulevaa ilmastoa.

Olemme arvioineet todennäköisyysjakaumien muuttumista ilmastomallitulosten perusteella. Nykyistä tai tulevaa ilmastoa edustava todennäköisyysjakauma muodostetaan aiempia havaintoarvoja muokkaamalla. Kukin yksittäinen havaintoarvo (esim. tietyn kuukauden keskilämpötila tai sademäärä) muutetaan sellaiseksi, jollaisen sen voitaisiin odottaa toteutuvan vastaavallisessa tilanteessa tämän hetken tai tulevaisuuden ilmastossa. Laskelmassa otetaan huomioon (i) maapallon keskilämpötilan jo havaittu muutos ja sen ennustettu muuttuminen tulevaisuudessa, sekä (ii) mallien antamat ennusteet siitä, miten paikalliset keskimääräiset ilmasto-olot ja ilmaston vuosienvälinen vaihtelevuus muuttuvat maapallon keskilämpötilan noustessa (*Räisänen ja Ruokolainen, 2008a*).



Kuva 36: Maaliskuun keskilämpötila Helsingin Kaisaniemessä. Mustat pallukat edustavat havaittua keskilämpötilaa seitsemänä esimerkivuotena (1901, 1917, ..., 2000). Pisteviivat kertovat, kuinka näiden maaliskuiden keskilämpötiloja ekstrapoloitiin ajassa eteenpäin ottaen huomioon tähänastinen maapallon keskilämpötilan vaihtelu sekä ilmastomallien tulokset. Tässä havainnollistuskuvassa ei ole otettu huomioon vaihtelua eri ilmastomallien tulosten välillä, vaan on käytetty keskiarvoja 22:sta A1B-päästöskenaarioon perustuvasta mallikokeesta. Varsinaisia todennäköisyysarvioita laskettaessa tämä vaihtelu kuitenkin otetaan huomioon.

Menetelmää havainnollistaa kuva 36, jossa esimerkkinä käytetään maaliskuun keskilämpötilaa Helsingissä. Maapallon keskilämpötilan jo havaittu ja ennustettu tuleva nousu johtaa ilmastomallien mukaan Suomessa sekä maaliskuiden lämpenemiseen (siten että muutos on malleissa keskimäärin noin puolitoistakertainen maapallon keskilämpötilan muutokseen verrattuna) että

vuosienvälisen vaihtelun lievään vähenemiseen. Siksi lämpötilat kohoavat havaintoja eteenpäin ekstrapoloitaessa, ja muutos on suurempi kylmille (esim. 1917 ja 1987) kuin leudoille (esim. 1920 ja 1989) maaliskuille. Esimerkiksi vuoden 2007 tienoilla vallitsevia ilmasto-oloja vastaavat lämpötila-arvot saadaan kuvasta vuoden 2007 kohdalla olevan pystyviivan kohdalta.

Lopuksi muokatuista havainnoista saatu diskreetti todennäköisyysjakauma tasoitetaan jatkuvaksi jakaumaksi ns. Gaussin ydintä käyttäen (*Räisänen ja Ruokolainen 2008a, b*). Jakauman ääripäissä saadut todennäköisyydet riippuvat melko paljon käytetystä tasoituskertoimesta ($0 < b \leq 1$, missä pienet b :n arvot tarkoittavat heikkoa ja suuret voimakasta tasoitusta), eikä tälle tasoituskertoimelle voida määrätä yksikäsitteistä oikeaa arvoa. Tämän esityksen laskelmissa on käytetty arvoa $b = 1/3$. Yleisen käsityksen mukaan oikeaoppisempi laskutapa jakauman ääripään todennäköisyyksien arviointiin olisi käyttää teoreettisia ääriarvojakaumia (liite 4), mutta tällaiset ääriarvojakaumat taas eivät ollenkaan sovi lämpötilan ja sademäärän todennäköisyysjakaumien sisäosien kuvaamiseen.

Liite 8: Yhteismitallistettujen lämpötila- ja sademäärä-skenaarioiden laskeminen

Ilmastomalleilla on tehty kolmea SRES-kasvihuonekaasuskenaariota (liite 5) vastaavia ajoja. A1B-skenaariota vastaava ajo oli käytettävissä kaikilta malleilta. A2- ja B1-simuloinnit puuttuivat muutamilta malleilta, mutta näiden puuttuvien ajojen tilalla oli mahdollista käyttää olemassaolevista ajoista skaalaamalla (*Ruosteenoja et al., 2007*) saatuja tuloksia. Lämpötilan ja sademäärän ennusteet laskettiin myös kolmelle muulle SRES-skenaariolle (A1FI, A1T ja B2). Näitä skenaarioita ei ollut käytetty malliajoissa, joten hankkeen verkkosivustolla esitetyt Suomen keskilämpötilat perustuvat niiden osalta kokonaan skaalaukseen.

Ilmastomuutostutkimuksissa on usein käytetty A2-skenaariota kuvaamaan voimakasta, B1-skenaariota heikkoa ilmaston muutosta. Lähestymistapa on ongelmallinen varsinkin silloin, kun ollaan kiinnostuneita ilmastonmuutoksesta lähivuosikymmeninä. Tässä vaiheessahan eri SRES-skenaariot eivät vielä mainittavasti poikkea toisistaan, eivät kasvihuonekaasujen pitoisuuksien (kuva 32) eivätkä myöskään toteutuvan ilmaston muutoksen (kuva 10) suhteen.

Tämän ongelman vuoksi olemme kehitelleet vaihtoehdoisen tavan, jonka avulla voidaan laskea mallituloksista voimakkuudeltaan erilaisia muutosskenaarioita lämpötilalle ja sademäärälle. Tässä laskutavassa otetaan **samanaikaisesti** huomion sekä kasvihuonekaasuskenaarioiden erot että mallien herkkyyden erilaisuus; lasketaan siis vain yhdet muutosennusteet, ei ennusteita eri kasvihuonekaasuskenaarioille erikseen. Käytännössä laskeminen tapahtuu seuraavasti:

Vaihe 1: Lasketaan 19 mallin tuottamista lämpötilan (sademäärän) muutoksista keskiarvo \bar{x} ja keskihajonta σ erikseen kolmelle skenaariolle (A1B, A2 ja B1). Keskiarvon ja hajonnan avulla saadaan muodostettua normaalijakauman tiheysfunktiot, esim.

$$f_{A1B} = \frac{1}{\sigma_{A1B}\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(x - \bar{x}_{A1B})^2}{2\sigma_{A1B}^2} \right\} \quad (1)$$

Muille skenaarioille tiheysfunktiot f_{A2} ja f_{B1} saadaan vastaavasti.

Vaihe 2: Lämpötilan (sademäärän) muutoksen todennäköisyysjakauman tiheysfunktio määrittyy näiden kolmen yksittäisen tiheysfunktion lineaarikombinaationa:

$$f = \frac{1}{3}f_{B1} + \frac{1}{3}f_{A1B} + \frac{1}{3}f_{A2} \quad (2)$$

Tässä on siis yksinkertaisuuden vuoksi oletettu jokaisen kasvihuonekaasuskenaariion toteutuminen yhtä todennäköiseksi.

Vaihe 3: Tiheysfunktio (2) ei enää vastaa muodoltaan normaalijakaumaa, mutta siitä voidaan laskea prosenttipisteet eli fraktiilit numeerisesti. Prosenttipisteistä mediaani (p=50%) on luonnollinen valinta muutoksen keskiskenaarioksi eli “parhaaksi arvioksi” tulevasta ilmastosta. Ala- ja yläskenaarioina voidaan käyttää esimerkiksi 5/95%:n tai 10/90%:n fraktiileja, jossaakin tapauksessa ehkä myös ala- ja yläkvartiileja (p=25% ja p=75%). Kaikkia näitä fraktiileja vastaavat muutokset laskettiin sekä kullekin vuoden 12 kuukaudelle että neljälle kolmen kuukauden pituiselle vuodenaajalle.

Vaihe 4: Edellisessä vaiheessa laskettuihin muutoksen todennäköisyysjakauman prosenttipisteisiin liittyy yksi vakava ongelma. Kun otetaan 3 kuukauden keskiarvoja yksittäisten kuukausien prosenttipistemutoksista, ei (mediaania lukuunottamatta) saadakaan samoja lukuarvoja kuin jos prosenttipisteet laskettaisiin suoraan eri mallien ennustamista koko vuodenajan muutoksista. Syynä tähän on se, että yksittäisille kuukausille lasketut muutoksen vaihtelevat mallista ja malliajosta toiseen enemmän kuin kolmen kuukauden keskiarvojen muutokset. Ongelmia syntyy etenkin silloin, kun tutkitaan jotakin sellaista ilmastolle herkkää ilmiötä, joka integroi useamman peräkkäisen kuukauden muutoksia. Tällainen ilmiö on esimerkiksi veden korkeus järvessä, johon vaikuttaa tarkasteltavan kuukauden ohella myös muutaman edeltävän kuukauden sademäärä ja haihdunta. Vastaavasti kasvin (esimerkiksi viljelykasvi tai metsän puu) kasvuun vaikuttaa useamman peräkkäisen kuukauden lämpötila ja sademäärä. Jos vaikutustutkimuksessa analysoidaan tällaista “integroivaa” järjestelmää, suoraan yksittäisten kuukausien arvoja käyttämällä saadaan esimerkiksi 95%:n yläskenaarioksi tarkasteltavan ilmiön kannalta liian harvinaisen voimakas muutos; todennäköisyys sille, että **monta peräkkäistä** kuukautta sattuu osumaan tähän yläskenaarioon, on selvästi pienempi kuin 5%.

Ongelman ratkaisemiseksi laskettiin yksittäisille kuukausille **yhteismitallistetut** muutoksen prosenttipisteet: yksittäisten kuukausien tuloksista laskettua mallitulosten välistä hajontaa pienennettiin keinotekoisesti niin, että kuukausimuutosten prosenttipisteet tulivat yhteismitalliseksi vuodenaikaismuutosten kanssa. Eli näin yhteismitallistettujen muutosten prosenttipisteet keskiarvo yli kolmen kuukauden vuodenajan antaa täsmälleen saman arvon kuin suoraan vuodenaikakeskiarvoista laskettu vastaava prosenttipiste. Yhteismitallistetut muutokset ovat paremmin sopivia esimerkiksi vesistö- ja kasvinkasvumallien syöttötiedoiksi.

Esitettyjen muutosennusteiden takana on implisiittisesti se olettaus, että nykyisissä malleissa kokonaisuutena tarkasteltuna ei ole suurta systemaattista virhettä. Toisin sanoen: 19 mallin keskiarvo olisi tämän mukaan kutakin skenaariota vastaavan tulevan muutoksen harhaton estimaatti. Tällöin ei ole luultavaa, että tuleva ilmastomuutos olisi ainakaan kovin paljoa 5% alaskenaariota heikompi tai 95% yläskenaariota voimakkaampi. Lähestymistavassa on myös se hyvä puoli, että skenaariot voidaan muodostaa eripituisille tarkastelujaksoille samalla tekniikalla. Mallitulosten erilaisuudesta johtuen menetelmä tuottaa toisistaan selvästi eroavat ala-, keski- ja yläskenaariot myös vuosisadan alkuvuosikymmenille.

Muutoksen prosenttipisteet laskettiin neljälle 30-vuotisjaksolle (2010–2039, 2020–2049, 2040–2069 ja 2070–2099), käyttäen vertailukohtana perusjaksoa 1971–2000. Koko Suomen aluekeskiarvona lasketut tiedot löytyvät hankkeen verkkosivustolta www.fmi.fi/acclim, osa myös liitteestä 10. Erikseen Etelä- ja Pohjois-Suomelle (leveyspiirin 63,75°N etelä- ja pohjoispuoli) lasketut prosenttipisteet ovat myös saatavissa.

Liite 9: Lämpötilan ja sademäärän muutosten todennäköisyysjakaumat Etelä- ja Pohjois-Suomessa lähivuosikymmeninä

Tässä esitettävät taulukot vuosikymmenille 2021–2030, 2031–2040 ja 2041–2050 on laskettu luvussa 3.3 kuvatulla A-menetelmällä eli samalla menetelmällä kuin vuosia 2011–2020 edustavat taulukot 1 ja 2 luvuissa 4.3 ja 4.4. Laskelma perustuu A1B-kasvihuonekaasuskenaarioon; eri skenaarioiden välisiä, vuosisadan alkupuolella vielä pienehköjä eroja ei ole otettu huomioon.

Taulukko 8: Todennäköisyysennusteita lämpötilan muutokselle (keskilämpötilan ero perusjaksoon 1971–2000 verrattuna). Parhaan arvion lisäksi on annettu epävarmuusväli, johon muutoksen voidaan odottaa osuvan 90% todennäköisyydellä. Suure $p(\Delta T > 0)$ kuvaa todennäköisyyttä, että lämpötila keskimäärin ylittää jakson 1971–2000 keskiarvon.

	Etelä-Suomi (60°N, 25°E)			Pohjois-Suomi (67.5°N, 27.5°E)		
	Paras arvio	Epävarmuusväli (5–95%)	$p(\Delta T > 0)$	Paras arvio	Epävarmuusväli (5–95%)	$p(\Delta T > 0)$
2021–2030						
Talvi (joulu–helmi)	1.9°C	0.0 ...3.4	95%	2.3°C	0.4 ...4.5	98%
Kevät (maalis–touko)	1.2°C	0.1 ...2.3	96%	1.5°C	0.1 ...2.7	97%
Kesä (kesä–elo)	0.9°C	-0.1 ...2.1	94%	1.0°C	0.1 ...2.4	96%
Syky (syys–marras)	1.2°C	0.2 ...2.1	97%	1.5°C	0.4 ...2.6	98%
Vuosikeskiarvo	1.3°C	0.2 ...2.2	98%	1.6°C	0.4 ...2.7	97%
2031–2040						
Talvi (joulu–helmi)	2.4°C	0.4 ...4.3	97%	2.9°C	0.9 ...5.5	99%
Kevät (maalis–touko)	1.6°C	0.3 ...2.7	98%	1.9°C	0.5 ...3.5	99%
Kesä (kesä–elo)	1.1°C	0.2 ...2.7	97%	1.4°C	0.2 ...3.2	98%
Syky (syys–marras)	1.5°C	0.5 ...2.7	98%	2.0°C	0.7 ...3.3	99%
Vuosikeskiarvo	1.7°C	0.5 ...2.7	98%	2.1°C	0.8 ...3.4	99%
2041–2050						
Talvi (joulu–helmi)	3.1°C	1.2 ...5.1	98%	3.8°C	1.4 ...6.7	100%
Kevät (maalis–touko)	2.1°C	0.8 ...3.3	99%	2.5°C	1.0 ...4.1	100%
Kesä (kesä–elo)	1.4°C	0.4 ...3.2	98%	1.8°C	0.5 ...3.8	100%
Syky (syys–marras)	2.0°C	0.8 ...3.2	99%	2.6°C	1.1 ...4.0	100%
Vuosikeskiarvo	2.2°C	1.0 ...3.3	99%	2.7°C	1.3 ...4.1	100%

Taulukko 9: Todennäköisyssennusteita sademäärän muutokselle (keskisademäärän muutos perusjaksoon 1971–2000 verrattuna). Parhaan arvion lisäksi on annettu epävarmuusväli, johon muutoksen voidaan odottaa osuvan 90% todennäköisyydellä. Suure $p(\Delta P > 0)$ edustaa todennäköisyyttä, että sademäärä keskimäärin ylittää jakson 1971–2000 keskiarvon.

	Etelä-Suomi (60°N, 25°E)			Pohjois-Suomi (67.5°N, 27.5°E)		
	Paras arvio	Epävarmuusväli (5–95%)	$p(\Delta P > 0)$	Paras arvio	Epävarmuusväli (5–95%)	$p(\Delta P > 0)$
2021–2030						
Talvi (joulu–helmi)	7%	-9...25	75%	9%	-8...24	78%
Kevät (maalis–touko)	5%	-12...24	70%	5%	-11...23	69%
Kesä (kesä–elo)	4%	-15...23	64%	4%	-10...18	66%
Syksy (syys–marras)	4%	-12...21	67%	6%	-10...19	72%
Vuosikeskiarvo	5%	-5...14	81%	5%	-4...14	84%
2031–2040						
Talvi (joulu–helmi)	9%	-7...27	82%	11%	-7...29	86%
Kevät (maalis–touko)	7%	-9...25	75%	7%	-10...25	74%
Kesä (kesä–elo)	4%	-14...26	62%	5%	-9...20	72%
Syksy (syys–marras)	5%	-11...22	72%	7%	-7...21	83%
Vuosikeskiarvo	6%	-3...16	89%	7%	-3...16	89%
2041–2050						
Talvi (joulu–helmi)	11%	-5...30	87%	14%	-4...33	91%
Kevät (maalis–touko)	9%	-9...28	78%	9%	-10...29	78%
Kesä (kesä–elo)	6%	-13...31	64%	7%	-8...23	76%
Syksy (syys–marras)	7%	-10...26	73%	9%	-5...25	85%
Vuosikeskiarvo	8%	-1...19	92%	9%	-1...19	94%

Liite 10: Lämpötilan ja sademäärän muutosten todennäköisyysjakaumat 30-vuotisjaksoittain

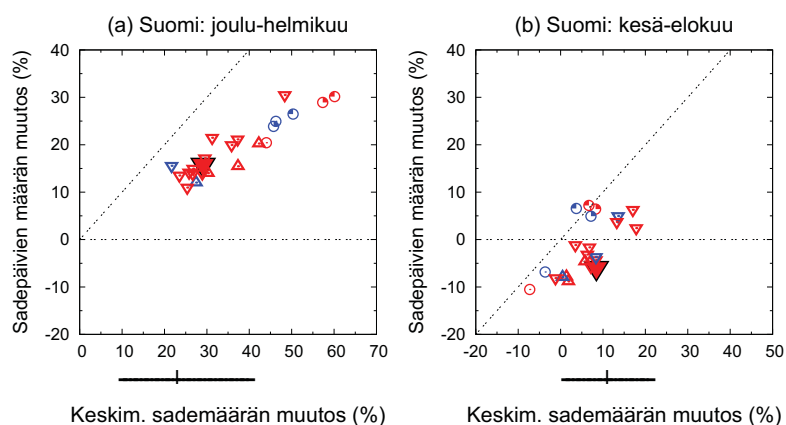
Seuraavalla sivulla esitettävät taulukot lämpötilan ja sademäärän muutoksista eri vuodenaajoille ja keskimäärin koko vuodelle on laskettu luvussa 3.3 kuvatulla B-menetelmällä olettaen A1B-, A2- ja B1-päästöskenaariot yhtä todennäköisiksi. Esitettyjen 30-vuotisjaksojen ohella on tarkasteltu myös jaksoa 2020–2049; sen tulokset ovat nähtävissä hankkeen verkkosivustolla www.fmi.fi/acclim. Sieltä ovat saatavissa myös erikseen eri kasvihuonekaasuskenaarioille laaditut taulukot.

Taulukko 10: Suomen keskilämpötilan ja sademäärän muuttuminen vuodenajoin ja vuosikeskiarvona verrattuna perusjaksoon 1971–2000. Muutokset on annettu kolmelle 30-vuotisjaksolle, kullekin paras arvio (50%:n piste) sekä kuusi muuta todennäköisyysjakauman prosenttipistettä. Muutoskenaariot perustuvat 19 maailmanlaajuisen ilmastomallin tuloksiin, ja niitä laadittaessa A1B-, A2- ja B1-päästöskenaariot on kukin oletettu yhtä todennäköisiksi.

(a) Lämpötilan muutos (°C)							
Prosenttipiste	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%
2010–2039							
Talvi	1.1	1.4	1.8	2.2	2.7	3.1	3.3
Kevät	0.4	0.6	1.0	1.4	1.9	2.3	2.5
Kesä	0.0	0.3	0.6	1.1	1.5	1.9	2.1
Syksy	0.6	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0	2.2
Vuosi	0.7	0.9	1.2	1.5	1.9	2.2	2.3
2040–2069							
Talvi	2.2	2.7	3.5	4.3	5.0	5.7	6.1
Kevät	1.1	1.5	2.1	2.8	3.5	4.1	4.4
Kesä	0.4	0.8	1.4	2.0	2.7	3.3	3.7
Syksy	1.3	1.6	2.1	2.7	3.2	3.7	4.1
Vuosi	1.4	1.8	2.3	3.0	3.6	4.1	4.4
2070–2099							
Talvi	3.1	3.7	4.8	6.1	7.4	8.4	9.0
Kevät	1.7	2.2	3.0	4.0	5.0	6.0	6.5
Kesä	0.7	1.1	1.9	2.8	3.8	4.8	5.4
Syksy	1.9	2.3	3.0	3.8	4.7	5.5	6.0
Vuosi	2.0	2.5	3.3	4.2	5.2	6.0	6.5
(b) Sademäärän muutos (%)							
Prosenttipiste	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%
2010–2039							
Talvi	1	2	5	7	9	12	13
Kevät	-3	-1	2	6	9	13	15
Kesä	-4	-2	1	4	7	10	12
Syksy	-2	0	2	5	8	10	12
Vuosi	1	2	4	5	7	9	10
2040–2069							
Talvi	4	6	10	15	19	23	25
Kevät	-2	1	5	10	16	20	23
Kesä	-1	1	4	8	11	15	17
Syksy	2	3	7	10	14	17	19
Vuosi	4	5	8	11	13	15	17
2070–2099							
Talvi	9	12	17	23	31	37	41
Kevät	1	4	10	16	22	28	31
Kesä	0	2	6	11	15	20	22
Syksy	4	6	10	15	20	24	27
Vuosi	7	9	12	16	20	24	26

Liite 11: Rankkasateiden, sadepäivien ja pitkien poutajaksojen muutokset

Käyttämämme alueellisten mallien aineisto tuottaa maapallonlaajuisiin CMIP3-malleihin perustuvaan todennäköisyysennusteeseen nähden varsin edustavan otoksen kesän sademäärän muutoksesta vuosisadan lopulle. Reunaehdot useimpiin ajoihin antaneen HadAM3H-mallin ennakoima muutos sijoittuu lähelle muiden maapallonlaajuisten mallien antamaa parasta arviota (pistediagrammin alapuolisen janan pystyväkänen kuvassa 37b), ja alueellisten mallien tulokset ryhmittäytyvät sen ympärille. Toisaalta muutamissa malliajoissa kesän sademäärät ovat vuosisadan lopulla nykyistä pienempiä, minkä todennäköisyys CMIP3-ajojen perusteella on vain noin 5%. Talvella alueellisten mallien mukaiset sademäärän muutokset ovat melko suuria aiemmin tekemäämme todennäköisyysennusteeseen verrattuna, vaikka niiden enemmistö jääkin parhaan arvion ja yläarvion väliin (janan pystypalkki ja etureuna kuvassa 37a). Syksyllä sitä vastoin sademäärät kasvavat CMIP3-malliaineiston konsensuksen nojalla enemmän kuin mitä tapahtuisi suurimpia muutoksia tuottavien alueellisten mallin mukaan. Keväällä puolestaan alueellisten simulaatioiden hajonta on ainakin yhtä leveä kuin maapallonlaajuistenkin (liite 10).



Kuva 37: Sadepäivien määrän muutokset Suomessa (a) talvella ja (b) kesällä verrattuna kokonaissademäärän muutokseen siirryttäessä jaksosta 1971–2000 jaksoon 2070–2099. Punaiset pikkusymbolit esittävät alueellisten ilmastomallikokeiden tuloksia A2-skenaariolle, siniset B2-skenaariolle. Iso punainen kolmio esittää maapallonlaajuisen HadAM3H-A2 -malliajon tulosta; tätä mallia enemmistö alueellisista malleista (alaspäin osoittavat pikkukolmiot) käytti reunaehtoinaan. Muutama rinnakkaisajo tarkensi HadAMHP-mallia (ylöspäin osoittavan pikkukolmiot) tai ECHAM4/OPYC-mallia (ympyrät). Pistediagrammien alla olevat janat näyttävät maapallonlaajuisiin malleihin perustuvat arviot kokonaissademäärän muutoksesta (katso kuvan 19 selitysteksti ja liite 10). Huomaa vaaka-akselin erilainen asteikko talvelle ja kesälle.

Hyödyntäen kuvaa 37 kesän ja talven sadepäivien määrälle sekä vastaavia kuvia muille vuodenaajoille ja vuorokautisille sadesuureille olemme tehneet yrityksen antaa sellaisia kvantitatiivisia arvioita sadepäivien määrän, rankkasateiden ja poutajaksojen muutoksista vuodenaajoittain, että ne olisivat yhteensopivia maapallonlaajuisten mallien tulosten kanssa. Taulukko 11 esittää vuodenajoittain kokonaissademäärän muutoksen parasta arviota (liite 10) vastaavat arviot sadepäivien määrän, rankkasateiden ja poutajaksojen pituuden muutoksille. Arviot on tehty kuvien perusteella silmämääräisesti 5%:n tarkkuudella. Näiden sadesuureiden epävar-

muushaarukkaa on myös pyritty arvioimaan suhteessa keskimääräisen sademäärän muutoksen 90%:n todennäköisyysväleihin (liite 10). Silloin kun sadesuureen ja kokonaissademäärän muutosten suuruuden välillä ilmeni selvä yhteys, tätä hyödynnettiin epävarmuusväliä määrittäessä. Korrelaation ollessa vähäinen epävarmuusväli arvioitiin sen perusteella, millaisia arvoja antoivat ne mallikokeet, joiden mukainen kokonaissademäärän muutos osui maailmanlaajuisten malliajojen mukaisiin 90%:n todennäköisyysväliin.

Taulukko 11: Sadepäivien määrän, keskimäärin suurimman vuorokausisateen ja pisimmän poutajakson keskimääräiset muutokset (%) Suomessa vuodenajoittain ja koko vuodelle jaksoon 2070–2099 mennessä verrattuna jakson 1971–2000 tilanteeseen. Parhaan arvion lisäksi on suluissa annettu epävarmuusväli, jonka arvioimiseen on käytetty apuna maailmanlaajuisiin malleihin perustuvaa keskimääräisen sademäärän muutoksen 90%:n todennäköisyysväliä (tarkemmin tekstissä). Normaalilla kirjaisimella kirjoitetut arvot ovat suoraan alueellisten mallien tuloksia. Kursivoitu tulos on määritetty 90%:n todennäköisyysvälin avulla, ja se on annettu vain jos poikkeama alueellisten mallien tuloksista oli vähintään 5 prosenttiyksikköä. Tällöin yläindeksinä oleva plusmerkki (miinusmerkki) tarkoittaa sitä, että ainakin jokunen alueellinen mallikoe näyttäisi itseisarvoltaan suurempaa (pienempää) muutosta. Kaikki arvot on annettu 5 prosenttiyksikön tarkkuudella.

	Sadepäivät		Rankkasateet		Kuivat jaksot	
Talvi	15	(5 ⁺ -25 ⁺)	20	(5 ⁺ -35 ⁺)	-10	(-20 ⁺ - 0)
Kevät	5	(-10 -20 ⁺)	20	(10 - 30)	-5	(-25 ⁺ -10)
Kesä	0	(-10 - 10)	20	(5 - 30)	0	(-20 - 20)
Syksy	0	(-10 - 15)	20	(10 - 30)	5	(-20 - 10 ⁺)
Vuosi	5	(0 - 15)	20	(10 - 30)	-5	(-20 ⁺ -10)

A Figure captions in English

Figure 1. A schematic presentation of sources of uncertainty in the climate change projections with variable time-scale. The horizontal axis represents the time, the vertical axis changes in a climate variable (temperature, precipitation etc.). Past variations are depicted by a red curve. Coloured bands represent uncertainty in the future projection due to various factors; natural variability in the climate system (grey), differences among the various models (green) and uncertainty in future greenhouse gas concentrations (orange). Note that the quantitative contributions of each factor varies significantly. The contribution from natural variability, for instance, is less important for large spatial and temporal scales. On the other hand, the fraction of natural variability is larger for precipitation than for temperature.

Figure 2. A comparison of the two methods of calculating temperature (left panel) and precipitation (right panel) change from 1971–2000 to 2020–2049, averaged over Finland. Probability distribution for the change estimated by method A (resampling) is shown in red, the corresponding distribution produced by method B (where the contribution from natural variability is minimized) in grey. The lower end of each column corresponds to the 5%, the upper end the 95% point of the probability distribution. The 25th, 50th and 75th percentiles are denoted by black lines. The pairs of columns from left to right represent the four 3-month seasons: Dec–Feb (JOU–HEL), Mar–May (MAA–TOU), Jun–Aug (KES–ELO) and Sep–Nov (SYY–MAR).

Figure 3. (a) 20-year and (b) 50-year return level estimates of daily minimum temperature in February. (c) 20-year and (d) 50-year return level estimates of daily maximum temperature in July. The locations of the observing stations are marked with red dots, and the colored squares indicate the return levels (in °C). The best estimate is shown by the colour of the middle square, and the 95% confidence intervals by the left and right hand side squares. See legend.

Figure 4. Same as Figure 3 except for the 20-year return level estimates (in days) of cold spells (left; number of consecutive days with minimum temperature below -20°C) and hot spells (right; number of consecutive days with maximum temperature above 25°C).

Figure 5. The annual maximum temperature at the Helsinki Kaisaniemi station for 1853–2008 and the 20-year return level estimate, with 95 % confidence intervals, calculated using different 30-year periods.

Figure 6. (a) 20-year return level estimates, with 95 % confidence intervals, for daily (black) and monthly (red) precipitation amounts based on observations at 12 stations. The stations denoted here by numbers can be identified using Appendix 1. (b) The variation of 50-year return level estimates of precipitation amounts for daily, five days, 14 days and 30 days among the 12 stations. Shown are (from bottom to top) the minimum, the 1st quartile, the median, the 3rd quartile and the maximum.

Figure 7. (a) 20-year return level estimates, with 95 % confidence intervals, for the length of periods when the precipitation sum of consecutive days is less than, or equal to, 10 mm (black) or 100 mm (red), based on observations at 12 stations shown in Appendix 1. (b) The variation of 50-year return level estimates of the length of periods when the precipitation sum of consecutive days is less or equal to 10, 25, 50 or 100 mm among the 12 stations. Shown are (from bottom to top) the minimum, the 1st quartile, the median, the 3rd quartile and the maximum.

Figure 8. Projected warming (in °C) from 1971–2000 to 2070–2099 over Europe and Northern Atlantic Ocean under the A1B greenhouse gas scenario taken from an average of the responses simulated by 19 global climate models. The upper panel depicts the annual mean, the middle panel December–February, and the lower panel June–August.

Figure 9. Projected precipitation change (in %) from 1971–2000 to 2070–2099. For further information, see caption for Figure 8.

Figure 10. Projections for (a) the annual mean temperature and (b) the precipitation change for the period 2000–2100, relative to the mean of the reference period 1971–2000. The curves depict 11 year running means, averaged over Finland and the responses of 19 global climate models. Projections are given separately for the three greenhouse gas scenarios (A2, A1B and B1).

Figure 11. Probabilistic forecasts of annual mean temperature change in (a) southern (60°N, 25°E) and (b) northern (67.5°N, 27.5°E) Finland, decade by decade to the year 2050. The changes are expressed as differences from the mean value for the period 1971–2000. The box-whisker plots show the 5th, 10th, 25th, 50th, 75th, 90th and 95th percentiles of the distributions. The two rows of numbers in the bottom give the medians of the estimated probability distributions (in °C) and the probability of temperature increase relative to 1971–2000 (in per cent).

Figure 12. Probabilistic forecasts of annual mean precipitation change in (a) southern (60°N, 25°E) and (b) northern (67.5°N, 27.5°E) Finland, decade by decade to the year 2050. The changes are expressed as percentage differences from the mean value of the period 1971–2000. The box-whisker plots show the 5th, 10th, 25th, 50th, 75th, 90th and 95th percentiles of the distributions. The two rows of numbers in the bottom give the medians of the estimated probability distributions (in per cent of the mean precipitation in 1971–2000) and the probability of precipitation increase.

Figure 13. Probability distributions for the projected changes of temperature (in °C, left panels) and precipitation (in %, right panels) over Finland. The panels from top to bottom depict the periods 2010–2039, 2040–2069 and 2070–2099, relative to the reference period 1971–2000. The projections are based on the simulations performed with 19 global climate models, with the A1B, A2 and B1 greenhouse gas scenarios considered equally likely. The lower end of each column corresponds to the 5%, the upper end the 95% point of the distribution. The 25th, 50th and 75th percentiles are denoted by black lines. Responses are given separately for each calendar month (T=January, H=February etc.). The monthly percentiles have been made commensurable with the 3-month seasonal probability distributions.

Figure 14. Projected changes in the annual mean temperature (left panel) and precipitation (right panel) in Finland for four tridecadal future periods, with reference to the mean of 1971–2000. In each column, percentiles from the bottom to the top are: 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90% and 95%. The projections are based on the simulations performed with 19 global climate models, with the A1B, A2 and B1 greenhouse gas scenarios considered equally likely.

Figure 15. Mean temperatures (in °C) for July (upper panels) and February (lower panels) in Finland for the periods 1971–2000 (left column), 2020–2049 (middle column) and 2070–2099 (right column). For 1971–2000, mean temperatures are derived purely from observations. For

the future periods, the model-based best estimate of temperature increase is added to the observational temperatures. Equal weight is given for every one of the 19 global climate models, and the A1B, A2 and B1 greenhouse gas scenarios are considered equally likely.

Figure 16. Mean precipitations (in mm/month) for July (upper panels) and February (lower panels) in Finland for the periods 1971–2000 (left column), 2020–2049 (middle column) and 2070–2099 (right column). For 1971–2000, mean precipitation is derived from observations. For the future periods, observational precipitation is multiplied by the model-based best estimate of relative precipitation change. For further information, see caption for Figure 15.

Figure 17. Projected changes in the duration of thermal seasons (in days) from 1971–2000 to 2070–2099 under the A1B scenario: spring (top left), summer (top right), autumn (bottom left) and winter (bottom right). Temperature increase corresponds to a mean of the simulations performed with 19 global climate models. Contour interval is 5 days for summer and 10 days for the other seasons. Note a different colour scale in the panel for winter. In coastal areas to the west and south of the black bold contour depicted in the panel for winter, thermal winter disappears by 2070–2099.

Figure 18. Projected changes in the length of the thermal growing season from 1971–2000 to 2070–2099 under the A1B scenario. Contour interval is 5 days.

Figure 19. Projected changes in daily minimum (left) and maximum (right) temperatures in Finland in winter (top) and summer (bottom) versus changes in mean temperature from 1971–2000 to 2070–2099. The diagonals divide the scatter plots into two parts; in the upper part changes in daily extremes are larger than changes in daily means and vice versa in the lower part. The red symbols depict regional climate model projections under the A2 scenario, the blue ones under the B2 scenario. A majority of the projections (small triangles pointing downwards) were driven by lateral boundary conditions from global model experiments by the HadAM3H model. A few simulations used downscaled experiments by the HadAM3P model (small triangles pointing upwards) and a few those by the ECHAM4/OPYC3 model. Horizontal bars below the diagrams show the 5–95 % uncertainty ranges of the mean temperature changes and the tick the median estimate, as derived from the global model simulations (see Appendix 10).

Figure 20. (a) Annual number of frost days and (b) annual number and December-February number of freezing point days based on observations in 1971–2000. Mean, maximum and minimum values are given. For more information on the weather stations numbered as 1–12, see Appendix 1.

Figure 21. Projections for percentage changes in (a) the annual number of frost days, (b) the frost-season (defined as the number of days between the first frost in autumn and the last frost in spring), and (c) the annual number of freezing point days in Northern European land areas for the period 2071–2100, relative to the mean of the period 1961–1990. The projections are based on simulations performed with seven regional global climate models, driven by lateral boundary conditions from the HadAM3H global model under the A2 forcing scenario. Contour interval is 10 %.

Figure 22. Projections for percentage changes in the average liquid water content of snow (a) in central Finland (62.25°N, 25.75°E) and (b) in Lapland (67.25°N, 26.25°E) in November (black), December (red), January (blue) and March (green) under the A2 forcing. The

curves depict 30 year running means, averaged over responses of 17 global climate models. The symbols show model-means based on regional climate model simulations for the period 2070–2099 (triangles show boundary forcing from HadAM3H; circles, boundary forcing from ECHAM4/OPYC3). The reference period for all the projections is 1971–2000 (the curves for February were close to those for March, and those for April to December).

Figure 23. Projections for percentage changes in the average (left) and annual maximum (middle) liquid water content of snow, and in the number of snow cover days (right), in Northern European land areas under the A2 forcing scenario for the period 2071–2100, relative to the mean of the period 1961–1990. The projections on the top row are based on simulations performed with six regional global climate models, driven by lateral boundary conditions from the HadAM3H global model. Those on the bottom row are based on simulations performed with three regional global climate models, driven by lateral boundary conditions from the ECHAM4/OPYC3 global model. Contour interval is 10 %.

Figure 24. Projected percentage changes in December–February mean number of days with more than 1 mm precipitation (left), maximum one-day precipitation amount (middle), and mean number of consecutive dry days (right) from 1961–1990 to 2071–2100. The maps depict multi-model mean changes based on seven (top) or three (bottom) regional climate models, driven by lateral boundary conditions from HadAM3H (top) or ECHAM4/OPYC3 (bottom) under the A2 forcing scenario. In land areas shown by white the models disagree about the sign of the change (see Fig. 25 for details). The contour interval is 10 %.

Figure 25. Same as Fig. 24 excepts for June–August. Three out of seven models disagree on the sign of the change in white land areas (top row), and the sign of the change varies from grid point to grid point according to at least two models in white land areas (bottom row).

Figure 26. Projected change (from 1971–2000 to 2070–2099) in the percentage total cloudiness in Central Finland (62.25°N, 26.25°E) for each calendar month (1=January, 2=February, etc.). A mean of 19 global climate models is shown, with the red curve representing the A2 and the green curve the B1 greenhouse gas scenario.

Figure 27. Distributions of (a) December and (b) March mean temperature in Helsinki. The frequency distributions obtained directly from the observations for 1901–2005 are shown by bars, and the continuous probability distributions fitted to these data are shown by blue solid lines. Model-based estimates of the probability distributions for the actual present-day climate are given by red dashed lines.

Figure 28. Same as Fig. 27 excepts for (a) December and (b) July precipitation sum.

Figure 29. Lowest wintertime minimum temperatures in Helsinki. (a) Observations in 1845–2008 (with an effect of an urban heat island) and a linear trend fitted to the observations. (b) Shifts in the probability density function (GEV distribution) of wintertime minimum temperature in Helsinki. Coloured curves depict distributions for winters 1899/1900 (blue), 1949/1950 (green) and 2007/2008 (red). If no trend in the temperature values are taken into account, the resulting stationary distribution is that given by the black curve.

Figure 30. The 2–200 year return level estimates (corresponding to an annual probability of occurrence of 0.5–50%) for wintertime minimum temperatures in Helsinki. (a) Return period (probability) for minimum temperature colder than that given by the vertical axis. (b) Same

as (a) but for minimum temperatures at the warmer tail of the distribution. Solid curves, see caption for Fig. 29. Black dashed curves indicate the 95% confidence levels for return levels if a warming trend is neglected. Note unequal scales in the vertical axes.

Figure 31. Projected changes in winter (left) and summer (right) mean temperature in northern Finland (top) and southern Finland (bottom) during the this century. The green curve indicates the best (median) estimate. The lower edge corresponds to the 5th percentile and the upper edge to the 95th percentile. The estimates are based on about 20 global climate models. In the first half of the century (red; uncertainty interval calculated by the resampling method, see *Räisänen and Ruokolainen (2006)*) the emphasis is on natural variability, not in differences in emission scenarios. In the latter half (blue; the contribution of natural variability minimized) the A1B, A2 and B1 greenhouse gas scenarios are considered equally likely.

Figure 32. Estimated temporal evolution of the emissions (left panel) and atmospheric concentration (right panel) of carbon dioxide under three SRES greenhouse gas scenarios. Observed emissions and concentrations for years 2000–2007 are depicted as well. Figures for the SRES scenarios are based on *IPCC (2001)* and the observed data are available for download from the University of East Anglia and NOAA/ESRL.

Figure 33. Estimated temporal evolution of sulphur dioxide emissions (left panel) and the atmospheric load of sulphate aerosols (right panel) under three SRES scenarios, based on the data given by *IPCC (2001)*.

Figure 34. Multi-model mean simulated annual mean temperature change (a) from 1971–2000 to 2011–2020 and (b) from 2051–2080 to 2086–2095 (*Räisänen and Ruokolainen, 2006*). The global mean temperature change is 0.62°C in both cases.

Figure 35. Changes from 1971–2000 to 2011–2020 in annual mean temperature ($^{\circ}\text{C}$, horizontal axis) and precipitation (% , vertical axis) in southern Finland (60°N , 25°E). Black markers; changes from 1971–2000 to 2011–2020 as simulated by climate models under the SRES A1B scenario. Grey markers; other plausible realizations of climate change derived using the resampling ensemble technique of *Räisänen and Ruokolainen (2006)*.

Figure 36. March mean temperature at the Helsinki Kaisaniemi station. The closed circles represent observed March mean temperatures in seven individual years (1901, 1917, ..., 2000). The dotted lines illustrate the extrapolation of these temperatures forward in time, using information on the observed global mean temperature change and results from climate models. The figure is based on multi-model mean results (22 model simulations under the A1B forcing scenario). However, the actual probability estimates represented in Section 4.14 take into account the variation of climate change between different models.

B Table captions in English

Table 1. Probabilistic forecasts of temperature change (difference in mean temperature between the decade 2011–2020 and the current normal period 1971–2000). $p(\Delta T > 0)$ gives the probability that the mean temperature in 2011–2020 will exceed the mean of 1971–2000. (Etelä-Suomi = Southern Finland, Pohjois-Suomi = Northern Finland, Paras arvio = Best estimate, Epävarmuusväli = Uncertainty range, Talvi (joulu–helmi) = Winter (DJF), Kevät (maalis–touko) = Spring (MAM), Kesä (kesä–elo) = Summer (JJA), Syksy (syys-marras) = Autumn (SON), Vuosikeskiarvo = Annual mean.

Table 2. Probabilistic forecasts of precipitation change (difference in mean precipitation between the decade 2011–2020 and the baseline period 1971–2000). $p(\Delta P > 0)$ gives the probability that the mean precipitation in 2011–2020 will exceed the mean of 1971–2000. For translations in English, see caption for Table 1.

Table 3. An indicative description about seasonal changes in climate variables by the end of this century. 1st column, the variables; 2nd column, area of interest (Pohjoinen = northern Finland, Etelä = southern Finland); columns 3-7, seasons (XII–II, December–February; III–V, March–May; VI–VIII, June–August; IX–XI, September–November; vuosi = annual); 8th column, remarks. The variables from top to bottom in the 1st column are as follows: mean temperature, mean precipitation, thermal season length, daily maximum temperature, daily minimum temperature, number of frost days, number of freezing point days, snow water equivalent, number of snow cover days, number of days with precipitation, intensity of heavy precipitation, number of consecutive dry days, cloudiness, soil frost. The right hand side panel shows the colour code: (dark) red for (notable) increases, (dark) blue for (notable) decreases, green for little changes, parenthesis for large uncertainty, empty for unknown or irrelevant.

Table 4. List of the weather stations employed in the return period analysis, including the LPNN number and the latitude and longitude of each station. For Vantaa, observations are missing for April of 1986 and for Muonio from November of 1982 to January of 1983.

Table 5. Climate variables and the time period of data for each station, as considered in calculations of return levels (Venäläinen *et al.*, 2007a).

Table 6. Global climate models employed in this report. Column 1 gives the model acronym, column 2 the country of origin. Column 3 gives the horizontal resolution of each model, i.e., the model grid size in degrees of latitude by longitude. The number of model levels in the vertical direction is given in column 4. Models labelled with an asterix are merely employed in composing the short-term projections by means of the resampling method.

Table 7. The regional climate model experiments considered here, with the following characteristics defined: the model acronym, country of origin, acronym of the driving GCM and the SRES scenarios employed, together with the number of ensemble simulations (in parentheses).

Table 8. Probabilistic forecasts of temperature change (difference in mean temperature relative to the mean of 1971–2000). $p(\Delta T > 0)$ gives the probability that the mean temperature in the given decade will exceed the mean of 1971–2000. For translations in English, see caption for Table 1.

Table 9. Probabilistic forecasts of precipitation change (difference in mean precipitation relative to the mean of 1971–2000). $p(\Delta P > 0)$ gives the probability that the mean precipitation in the given decade will exceed the mean of 1971–2000. For translations in English, see caption for Table 1.

Table 10. Projected changes in the seasonal and annual mean (a) temperature and (b) precipitation as averaged over the territory of Finland for three tridacadal future periods, relative to 1971–2000 (talvi = winter, kevät = spring, kesä = summer, syksy = autumn and vuosi = annual mean). In addition to the best estimate (50th percentile), six other percentiles of the probability distribution are given (5%, 10%, 25%, 75%, 90% and 95%). The projections are based on the simulations performed with 19 global climate models, with the A1B, A2 and B1 greenhouse gas scenarios considered equally likely.

Table 11. Projected area-averaged changes (%) in the 30-year means of the number of wet days (the 2nd column, “Sadepäivät”), the greatest 1-day precipitation total (the 3rd column, “Rankkasateet”), and the longest dry period (the 4th column, “Kuivat jaksot”) in winter (=talvi), spring (=kevät), summer (=kesä), autumn (=syksy) and annually (=vuosi) in Finland by 2070–2099, relative to the baseline period 1971–2000. In addition to the best estimates, the uncertainty ranges are given (in parenthesis). To define these, 95% probability intervals of changes in mean precipitation based on global climate model projections are used in addition to regional climate model simulations (see text for details). Normal font is used for results directly based on the regional climate models. Italic font indicates that the result is obtained with the aid of a corresponding 95% probability interval; it is given only if it deviates from the outcoming of the regional climate model simulations by more than 5 percentage units. In such a case the plus sign implies a larger change (increase or decrease) by at least some RCM simulations. All the values are given at a resolution of 5%.

RAPORTTEJA — RAPPORTER — REPORTS

- 1986:
1. Savolainen, Anna Liisa et al., 1986. Radioaktiivisten aineiden kulkeutuminen Tshernobylin ydinvoimalaonnettomuuden aikana. Väliaikainen raportti. 39 s.
 2. Savolainen, Anna Liisa et al., 1986. Dispersion of radioactive release following the Chernobyl nuclear power plant accident. Interim report. 44 p.
 3. Ahti, Kari, 1986. Rakennussääpalvelukokeilu 1985-1986. Väli­raportti Helsingin ympäristön talvikokeilusta 18.11.-13.3.1986. 26 s.
 4. Korhonen, Ossi, 1986. Pintatuulen vertailumittauksia lentoasemilla. 38 s.
- 1987:
1. Karppinen, Ari et al., 1987. Description and application of a system for calculating radiation doses due to long range transport of radioactive releases. 50 p.
 2. Venäläinen, Ari, 1987. Ilmastohavaintoihin perustuva arvio jyrshinturpeen tuotantoedellytyksistä Suomessa. 35 s.
 3. Kukkonen, Jaakko ja Savolainen, Anna Liisa, 1987. Myrkyllisten kaasujen päästöt ja leviäminen onnettomuustilanteissa. 172 s.
 4. Nordlund, Göran ja Rantakrans, Erkki, 1987. Matemaattisfysikaalisten ilmanlaadun arviointimallien luotettavuus. 29 s.
 5. Ahti, Kari, 1987. Rakennussäätutkimuksen loppuraportti. 45 s.
 6. Hakola, Hannele et al., 1987. Otsonin vaihteluista Suomessa yhden vuoden havaintoaineiston valossa. 64 s.
 7. Tammelin, Bengt ja Erkiö, Eero, 1987. Energialaskennan säätiedot – suomalainen testivuosi. 108 s.
- 1988:
1. Eerola, Kalle, 1988. Havaintojen merkityksestä numeerisessa säänennustuksessa. 36 s.
 2. Fredrikson, Liisa, 1988. Tunturisääprojekti 1986-1987. Loppuraportti. 31 s.
 3. Salmi, Timo and Joffre, Sylvain, 1988. Airborne pollutant measurements over the Baltic Sea: meteorological interpretation. 55 p.
 4. Hongisto, Marke, Wallin, Markku ja Kaila, Juhani, 1988. Rikkipäästöjen vähentämistoimenpiteiden taloudellisesti tehokas valinta. 80 s.

5. Elomaa, Esko et al., 1988. Ilmatieteen laitoksen automaattisten merisääsemien käyttövarmuuden parantaminen. 55 s.
 6. Venäläinen, Ari ja Nordlund, Anneli, 1988. Kasvukauden ilmastotiedotteen sisältö ja käyttö. 63 s.
 7. Nieminen, Rauno, 1988. Numeeristen paine- ja korkeuskenttäennusteiden objektiivinen verifiointisysteemi sekä sen antamia tuloksia vuosilta 1985 ja 1986. 35 s.
- 1989:
1. Ilvessalo, Pekko, 1989. Yksittäisestä piipusta ilmaan pääsevien epäpuhtauksien suurimpien tuntipitoisuuksien arviointimenetelmä. 21 s.
- 1992:
1. Mhita, M.S. and Venäläinen, Ari, 1991. The variability of rainfall in Tanzania. 32 p.
 2. Anttila, Pia (toim.), 1992. Rikki- ja typpilaskeuman kehitys Suomessa 1980-1990. 28 s.
- 1993:
1. Hongisto, Marke ja Valtanen Kalevi, 1993. Rikin ja typen yhdisteiden kaukokulkeutumismallin kehittäminen HIRLAM-säännustemallin yhteyteen. 49 s.
 2. Karlsson, Vuokko, 1993. Kansalliset rikkidioksidin analyysivertailut 1979 - 1991. 27 s.
- 1994:
1. Komulainen, Marja-Leena, 1995. Myrsky Itämerellä 28.9.1994. Säätilan kehitys Pohjois-Itämerellä M/S Estonian onnettomuusyönä. 42 s.
 2. Komulainen, Marja-Leena, 1995. The Baltic Sea Storm on 28.9.1994. An investigation into the weather situation which developed in the northern Baltic at the time of the accident to m/s Estonia. 42 p.
- 1995:
1. Aurela, Mika, 1995. Mikrometeorologiset vuomittausmenetelmät - sovelluksena otsonin mittaaminen suoralla menetelmällä. 88 s.
 2. Valkonen, Esko, Mäkelä, Kari ja Rantakrans, Erkki, 1995. Liikenteen päästöjen leviäminen katukuilussa - AIG-mallin soveltuvuus maamme oloihin. 25 s.
 3. Virkkula, Aki, Lättilä, Heikki ja Koskinen, Timo, 1995. Otsonin maanpintapitoisuuden mittaaminen UV-säteilyn absorptiolla: DOAS-menetelmän vertailu suljettua näytteenotto-tilaa käyttävään menetelmään. 29 s.
 4. Bremer, Pia, Ilvessalo, Pekko, Pohjola, Veijo, Saari, Helena ja Valtanen, Kalevi, 1995. Ilmanlaatuennusteiden ja -indeksin kehittäminen Helsingin Käpylässä suoritettujen mittausten perusteella. 81 s.

- 1996: 1. Saari, Helena, Salmi, Timo ja Kartastenpää, Raimo, 1996. Taajamien ilmanlaatu suhteessa uusiin ohjearvoihin. 98 s.
- 1997: 1. Solantie, Reijo, 1997. Keväthallojen alueellisista piirteistä ja vähän talvipakkastenkin. 28 s.
- 1998: 1 Paatero, Jussi, Hatakka, Juha and Viisanen, Yrjö, 1998. Concurrent measurements of airborne radon-222, lead-210 and beryllium-7 at the Pallas-Sodankylä GAW station, Northern Finland. 26 p.
- 2 Venäläinen, Ari ja Helminen, Jaakko, 1998. Maanteiden talvikunnossapidon sääindeksi. 47 s.
- 3 Kallio, Esa, Koskinen, Hannu ja Mälkki, Anssi, 1998. VII Suomen avaruustutkijoiden COSPAR-kokous, Tiivistelmät. 40 s.
- 4 Koskinen, H. and Pulkkinen, T., 1998. State of the art of space weather modelling and proposed ESA strategy. 66 p.
- 5 Venäläinen, Ari ja Tuomenvirta Heikki, 1998. Arvio ilmaston lämpenemisen vaikutuksesta teiden talvikunnossapidon kustannuksiin. 19 s.
- 1999: 1 Mälkki, Anssi, 1999. Near earth electron environment modelling tool user/software requirements document. 43 p.
- 2 Pulkkinen, Antti, 1999. Geomagneettisesti indusoidut virrat Suomen maakaasuverkostossa. 46 s.
- 3 Venäläinen, Ari, 1999. Talven lämpötilan ja maanteiden suolauksen välinen riippuvuus Suomessa. 16 s.
- 4 Koskinen, H., Eliasson, L., Holback, B., Andersson, L., Eriksson, A., Mälkki, A., Nordberg, O., Pulkkinen, T., Viljanen, A., Wahlund, J.-E., Wu, J.-G., 1999. Space weather and interactions with spacecraft : spee final report. 191 p.
- 2000: 1 Solantie, Reijo ja Drebs, Achim, 2000. Kauden 1961 - 1990 lämpöoloista kasvukautena alustan vaikutus huomioiden, 38 s.
- 2 Pulkkinen, Antti, Viljanen, Ari, Pirjola, Risto, and Bear working group, 2000. Large geomagnetically induced currents in the Finnish high-voltage power system. 99 p.
- 3 Solantie, R. ja Uusitalo, K., 2000. Patoturvallisuuden mitoitussadannat: Suomen suurimpien 1, 5 ja 14 vrk:n piste- ja aluesadantojen analysointi vuodelt 1959 - 1998 kattavasta aineistosta. 77 s.

- 4 Tuomenvirta, Heikki, Uusitalo, Kimmo, Vehviläinen, Bertel, Carter, Timothy, 2000. Ilmastomuutos, mitoitusadanta ja patoturvallisuus: arvio sadannan ja sen ääriarvojen sekä lämpötilan muutoksista Suomessa vuoteen 2100. 65 s.
 - 5 Viljanen, Ari, Pirjola, Risto and Tuomi, Tapio, 2000. Abstracts of the URSI XXV national convention on radio science. 108 p.
 - 6 Solantie, Reijo ja Drebs, Achim, 2000. Keskimääräinen vuoden ylin ja alin lämpötila Suomessa 1961 - 90. 31 s.
 - 7 Korhonen, Kimmo, 2000. Geomagneettiset mallit ja IGRF-appletti. 85 s.
- 2001:
- 1 Koskinen, H., Tanskanen, E., Pirjola, R., Pulkkinen, A., Dyer, C., Rodgers, D., Cannon, P., Mandeville, J.-C. and Boscher, D., 2001. Space weather effects catalogue. 41 p.
 - 2 Koskinen, H., Tanskanen, E., Pirjola, R., Pulkkinen, A., Dyer, C., Rodgers, D., Cannon, P., Mandeville, J.-C. and Boscher, D., 2001. Rationale for a european space weather programme. 53 p.
 - 3 Paatero, J., Valkama, I., Makkonen, U., Laurén, M., Salminen, K., Raittila, J. and Viisanen, Y., 2001. Inorganic components of the ground-level air and meteorological parameters at Hyytiälä, Finland during the BIOFOR project 1998-1999. 48 p.
 - 4 Solantie, Reijo, Drebs, Achim, 2001. Maps of daily and monthly minimum temperatures in Finland for June, July, and August 1961-1990, considering the effect of the underlying surface. 28 p.
 - 5 Sahlgren, Vesa, 2001. Tuulikentän alueellisesta vaihtelusta Längelmävesi-Roine -järvialueella. 33 s.
 - 6 Tammelin, Bengt, Heimo, Alain, Leroy, Michel, Rast, Jacques and Säntti, Kristiina, 2001. Meteorological measurements under icing conditions : EUMETNET SWS II project. 52 p.
- 2002:
- 1 Solantie, Reijo, Drebs, Achim, Kaukoranta, Juho-Pekka, 2002. Lämpötiloja eri vuodenaikoina ja eri maastotyypeissä Alajärven Möksyssä. 57 s.
 2. Tammelin, Bengt, Forsius, John, Jylhä, Kirsti, Järvinen, Pekka, Koskela, Jaakko, Tuomenvirta, Heikki, Turunen, Merja A., Vehviläinen, Bertel, Venäläinen, Ari, 2002. Ilmastomuutoksen vaikutuksia energiantuotantoon ja lämmitysenergian tarpeeseen. 121 s.
- 2003:
1. Vajda, Andrea and Venäläinen, Ari, 2003. Small-scale spatial variation of climate in northern Finland. 34 p.

2. Solantie, Reijo, 2003. On definition of ecoclimatic zones in Finland. 44 p.
 3. Pulkkinen, T.I., 2003. Chapman conference on physics and modelling of the inner magnetosphere Helsinki, Finland, August 25 -29, 2003. Book of abstracts. 110 p.
 4. Pulkkinen, T. I., 2003. Chapman conference on physics and modelling of the inner magnetosphere Helsinki, Finland, August 25 -29, 2003. Conference program. 16 p.
 5. Merikallio, Sini, 2003. Available solar energy on the dusty Martian atmosphere and surface. 84 p.
 6. Solantie, Reijo, 2003. Regular diurnal temperature variation in the Southern and Middle boreal zones in Finland in relation to the production of sensible heat. 63 p.
- 2004:
1. Solantie, Reijo, Drebs, Achim and Kaukoranta, Juho-Pekka, 2004. Regular diurnal temperature variation in various landtypes in the Möksy experimental field in summer 2002, in relation to the production of sensible heat. 69 p.
 2. Toivanen, Petri, Janhunen, Pekka and Koskinen, Hannu, 2004. Magnetospheric propulsion (eMPii). Final report issue 1.3. 78 p.
 3. Tammelin, Bengt et al., 2004. Improvements of severe weather measurements and sensors – EUMETNET SWS II project. 101 p.
 4. Nevanlinna, Heikki, 2004. Auringon aktiivisuus ja maapallon lämpötilan vaihtelut 1856 - 2003. 43 s.
 5. Ganushkina, Natalia and Pulkkinen, Tuija, 2004. Substorms-7: Proceedings of the 7th International Conference on Substorms. 235 p.
 6. Venäläinen, Ari, Sarkkula, Seppo, Wiljander, Mats, Heikkinen, Jyrki, Ervasto, Erkki, Poussu, Teemu ja Storås, Roger, 2004. Espoon kaupungin talvikunnossapidon sääindeksi. 17 s.
 7. Paatero, Jussi and Holmen, Kim (eds.), 2004. The First Ny-Ålesund - Pallas-Sodankylä atmospheric research workshop, Pallas, Finland 1 - 3 March 2004 - Extended abstracts. 61 p.
 8. Holopainen, Jari, 2004. Turun varhainen ilmastollinen havaintosarja. 59 s.
- 2005:
1. Ruuhela, Reija, Ruotsalainen, Johanna, Kangas, Markku, Aschan, Carita, Rajamäki, Erkki, Hirvonen, Mikko ja Mannelin, Tarmo, 2005. Kelimallin kehittäminen talvijalankulun turvallisuuden parantamiseksi. 47 s.

2. Laurila, Tuomas, Lohila, Annalea, Tuovinen, Juha-Pekka, Hatakka, Juha, Aurela, Mika, Thum, Tea, Walden, Jari, Kuronen, Pirjo, Talka, Markus, Pesonen, Risto, Pihlatie, Mari, Rinne, Janne, Vesala, Timo, Ettala, Matti, 2005. Kaatopaikkojen kaasupäästöjen ja haihdunnan mikrometeorologisten mittausten menetelmien kehittäminen (MIKROMETKAA). Tekesin Streams – ohjelman hankkeen loppuraportti. 34 s. (Ei julkaistu – Not published)
 3. Siili, Tero, Huttunen, Emilia, Koskinen, Hannu ja Toivanen, Petri (toim.), 2005. Kymmenes Suomen avaruustutkijoiden kokous (FinCospar) Kokousjulkaisu. 57 s.
 4. Solantie, Reijo and Pirinen, Pentti, 2005. Diurnal temperature variation in inversion situations. 34 s.
 5. Venäläinen, Ari, Tuomenvirta, Heikki, Pirinen, Pentti and Drebs, Achim, 2005. A basic Finnish climate data set 1961 – 2000 – description and illustrations. 24 p.
 6. Tammelin, Bengt, Sääntti, Kristiina, Dobeck, Hartwig, Durstewich, Michel, Ganander, Hans, Kury, Georg, Laakso, Timo, Peltola, Esa, Ronsten, Göran, 2005. Wind turbines in icing environment: improvement of tools for siting, certification and operation – NEW ICETOOLS. 127 p.
- 2006:
1. Mälkki, Anssi, Kauristie, Kirsti and Viljanen Ari, 2006. Auroras Now! Final Report, Volume I. 73 p.
 2. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2006. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2003. 47 p.
 3. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2006. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2004. 47 p.
 4. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2006. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2005. 49 p.
 5. Viljanen, A. (toim.), 2006. Sähkömagnetiikka 2006. Tiivistelmät – Abstracts. 30 s.
 6. Tuomi, Tapio J. & Mäkelä, Antti, 2006. Salamahavainnot 2006 - Lightning observations in Finland, 2006. 39 p.
 7. Merikallio, Sini, 2006. Preliminary report of the analysis and visualisation software for SMART-1 SPEDE and EPDP instruments. 70 p.
 8. Solantie, Reijo, Pirinen, Pentti, 2006. Orografian huomioiminen loka-huhtikuun sademäärien alueellisissa analyysissä. 34 s.
 9. Ruosteenoja, Kimmo, Jylhä, Kirsti, Räisänen, Petri, 2006. Climate projections for the Nordic CE project – an analysis of an extended set of global regional climate model runs. 28 p.

10. Merikallio, Sini, 2006. Analysis and visualisation software for DEMETER Langmuir Probe instrument. 31 p.
- 2007:
1. Solantie, Reijo, Järvenoja, Simo, Pirinen, Pentti, 2007. Keskimääräisten kuukauden minimilämpötilojen alueellinen jakauma kautena 1992 – 2005 Suomessa sekä muutos kaudesta 1961 – 1990. 59 s.
 2. Pulkkinen, Tuija, Hari, Ari-Matti, Haukka, Harri, Leinonen, Jussi, Toivanen, Petri, Koskinen, Hannu, André, Mats, Balasis, Georgios, Boscher, Daniel, Dandouras, Iannis, Grande, Mauel, De Keyser, John, Glassmeier, Karl-Heinz, Hapgood, Mike, Horne, Richard, Ivchenko, Nikolay, Santolik, Ondrej, Torkar, Klaus; Trotignon, Jean Gabriel, Vennerstrøm, Susanne, 2007. Waves and acceleration of relativistic particles (WARP). 36 p.
 3. Harri, A-M., Leinonen, J., Merikallio, S., Paton, M., Haukka, H., Polkko, J., Linkin, V., Lipatov, V., Pichkadze, K., Polyakov, A., Uspensky, M., Vasquez, L., Guerrero, H., Crisp, D., Haberle, R., Calcutt, S., Wilson, C., Taylor, P., Lange, C., Daly, M., Richter, L., Jaumann, R., Pommereau, J-P., Forget, F., Lognonne, Ph., Zarnecki, J., 2007. MetNet – In situ observational network and orbital platform to investigate the Martian environment. 35 p.
 4. Venäläinen, Ari, Saku, Seppo, Kilpeläinen, Tiina, Jylhä, Kirsti, Tuomenvirta, Heikki, Vajda, Andrea, Räisänen, Jouni, Ruosteenoja, Kimmo, 2007. Sään ääri-ilmiöistä Suomessa. 81 s.
 5. Tuomi, Tapio J. & Mäkelä, Antti, 2007. Salamahavainnot 2007 - Lightning observations in Finland, 2007. 47 p.
 6. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2007. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2006. 49 p.
- 2008
1. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2008. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2007. 49 p.
 2. Verronen, Pekka T. (ed), 2008. 1st international HEPPA workshop 2008, Book of abstracts. 81 p.
 3. Gregow, Hilppa, Venäläinen, Ari, Laine, Mikko, Niinimäki, Niina, Seitola, Teija, Tuomenvirta, Heikki, Jylhä, Kirsti, Tuomi, Tapio ja Mäkelä, Antti, 2008. Vaaraa aiheuttavista sääilmiöistä Suomen muuttuvassa ilmastossa. 99 s.
 4. Tuomi, Tapio J. & Mäkelä, Antti, 2008. Salamahavainnot 2008 – Lightning observations in Finland, 2008. 49 p.
 5. Heino, Raino and Tolonen-Kivimäki, Outi (eds), 2008. Finnish national report on systematic observations for climate – 2008. 27 p.

6. Paatero, Jussi et al., 2008. Effects of Kola air pollution on the environment in the western part of the Kola peninsula and Finnish Lapland : final report. 26 p.
- 2009
1. Nevanlinna, H., 2009. Geomagnetismin ABC-kirja. 204 s.
 2. Nevanlinna, H. (toim.), 2009. Ilmatieteen laitos 170 vuotta, 1838 - 2008. 69 s.
 3. Nevanlinna, Heikki, 2009. Revontulihavainnot Suomessa 1748 – 2009. 88 s.
 4. Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Ruokolainen, L., Saku, S. ja Seitola, T., 2009. Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten. ACCLIM-hankkeen raportti 2009. 102 p.
 5. Mäkelä, Antti & Tuomi, Tapio, J., 2009. Salamahavainnot 2009 – Lightning observations in Finland, 2009. 51 p.
 6. Verronen, Pekka (ed.), 2009. 5th International Atmospheric Limb Conference and Workshop : Book of abstracts. 92 p.
 7. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2009. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2008. 48 p.

Ilmatieteen laitos
Erik Palménin aukio 1, Helsinki
tel. (09) 19 291
www.fmi.fi

ISBN 978-951-697-699-3
ISSN 0782-6079
Yliopistopaino
Helsinki 2009