



ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

RAPORTTEJA
RAPPORTER
REPORTS
2011:6

RAKENNUSTEN ENERGIALASKENNAN
TESTIVUOSI 2012 JA ARVIOT
ILMASTONMUUTOKSEN VAIKUTUKSISTA

KIRSTI JYLHÄ
TARGO KALAMEES
HANNA TIETÄVÄINEN
KIMMO RUOSTENOJA
JUHA JOKISALO
REIJO HYVÖNEN
SIMO ILOMETS
SEPPO SAKU
ASKO HUTILA

RAPORTTEJA

RAPPORTER

REPORTS

No. 2011: 6

551.5, 551.582, 628.8

644.1, 697.1

Rakennusten energialaskennan testivuosi 2012 ja arviot ilmastonmuutoksen vaikutuksista

Kirsti Jylhä¹

Targo Kalamees^{2,3}

Hanna Tietäväinen¹

Kimmo Ruosteenoja¹

Juha Jokisalo²

Reijo Hyvönen¹

Simo Ilomets³

Seppo Saku¹

Asko Hutila¹

¹ Ilmatieteen laitos

² Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulu

³ Tallinna Tehnikaülikool

Ilmatieteen laitos

Meteorologiska Institutet

Finnish Meteorological Institute

Helsinki 2011

**Tämä julkaisu kuuluu Suomen itsenäisyyden juhlarahasto Sitran julkaisusarjaan
(Sitran Selvityksiä 53).**

Ilmatieteen laitos, raportteja 2011:6

ISBN 978-951-697-755-6 (nid.)

ISBN 978-951-697-756-3 (pdf)

ISSN 0782-6079

Sitran selvityksiä 53

ISSN 1796-7104 (nid.)

ISSN 1796-7112 (URL:<http://www.sitra.fi>)

Unigrafia

2011



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

Julkaisun sarja, numero ja raporttikoodi
Ilmatieteen laitos, Raportteja 2011:6
Sitran Selvityksiä 53

Julkaisu-aika 2011

Tekijät

Kirsti Jylhä, Targo Kalamees, Hanna Tietäväinen,
Kimmo Ruosteenoja, Juha Jokisalo, Reijo Hyvönen,
Simo Ilomets, Seppo Saku ja Asko Huttila

Projektin nimi

REFI-A

Nimeke

Rakennusten energialaskennan testivuosi 2012 ja arviot ilmastonmuutoksen vaikutuksista

Tiivistelmä

Ilmaston lämpeneminen vaikuttaa rakennusten lämmitys- ja jäähdytysenergian tarpeeseen. Tässä tutkimuksessa muodostettiin rakennusten energialaskennassa Suomessa käytettävät uudet sääaineistot, tuotettiin ilmastoskenaarioiden avulla rakennusten energialaskelmiin soveltuvat tulevaisuuden sääaineistot ja arvioitiin rakennusten energiankulutusta vuoden 2030 muuttuneessa ilmastossa

Rakennusten energialaskentaa varten kehitetty uusi testivuosi (TRY2012) korvaa aiemmin käytetyn testivuoden 1979. Uuden testivuoden tunnitaiset sääaineistot energialaskennan vyöhykkeillä I–II, III ja IV muodostettiin Vantaalla, Jyväskylässä ja Sodankylässä vuosina 1980–2009 tehtyjen säähavaintojen perusteella. Testivuoden kunkin kalenterikuukauden sääaineistot valittiin sellaiselta vuodelta, jonka aikana kyseisen kuukauden sääolot olivat mahdollisimman lähellä ilmastollista keskimääräistä tilaa. Käytännössä kalenterikuukausien valinta tehtiin tilastollisella menetelmällä tarkastellen lämpötilaa, kosteutta, auringon säteilyä ja tuulen nopeutta. Näitä neljää säämuuttujaa painotettiin sen mukaan, kuinka paljon ne vaikuttavat Suomessa rakennusten lämmitys- ja jäähdytystarpeeseen. Tyypilliselle uudispientalolle ja toimistorakennukselle tehdyt simuloinnit osoittivat, että lämmitys- ja jäähdytystarpeen kannalta tärkein säämuuttuja on ulkoilman lämpötila, mutta kesällä auringon säteilyn vaikutus on suunnilleen yhtä suuri.

Tutkimuksessa arvioitiin myös ilmastonmuutoksen vaikutuksia. Ilmastomallien tulosten pohjalta laadittiin tilastollisilta ominaisuuksiltaan vuosien 2030, 2050 ja 2100 arvioitua ilmastoa vastaavat tulevaisuuden testivuosien sääaineistot. Vuoden 2030 tienoilla vuoden keskilämpötilan arvioidaan olevan paikkakunnasta riippuen 1,2–1,5 astetta korkeampi kuin TRY2012:n perusteella. Talvella keskilämpötila nousee noin kaksi astetta ja kesällä vajaan asteen. Lämpötilan vaihtelevuus pienenee talvipuolella vuotta noin 10 %. Auringon säteilyn väheneminen talvella ja keväällä, tuulen vähäinen voimistuminen marras-helmikuussa ja ilman suhteellisen kosteuden pieni kasvu loka–huhtikuussa otettiin myös huomioon tulevaisuuden testivuosia laadittaessa.

Lopuksi arvioitiin ilmastonmuutoksen vaikutuksia rakennusten energiantarpeeseen nykyisiä rakentamismääräyksiä noudatettaessa. Laskelmissa esimerkkinä käytetyn pientalon tilojen ja ilmanvaihdon lämmitystarve vähenee vuoteen 2030 mennessä noin 10 % ja jäähdytystarve kasvaa 17–19 %. Toimistotalon lämmitystarve on vastaavasti 13% pienempi ja jäähdytystarve 13–15 % suurempi kuin nykyisessä ilmastossa. Kaikkiaan rakennusten kokonaisostoenergiankulutus vähenee vuoteen 2030 mennessä 4–7 % ilmaston muuttumisen takia.

Julkaisijayksikkö

Ilmastonmuutos (ILM)

Luokitus (UDK)

551.5, 551.582,
628.8, 644.1, 697.1

Asiasanat

Ilmasto, ilmastonmuutos, rakennustekniikka,
lämmitysenergia, jäähdytysenergia

ISSN ja avainnimeke

0782-6079 Raportteja - Rapporter – Reports
1796-7104 (nid.) 1796-7112 (pdf) Sitran Selvityksiä 53

ISBN

978-951-697-755-6 (nid.)
978-951-697-756-3 (pdf)

Kieli

suomi (tiivistelmä englanniksi)

Sivumäärä 110



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

Series title, number and report code of publication
Finnish Meteorological Institute, Reports 2011:6
Sitra Studies 53

Date 2011

Authors

Kirsti Jylhä, Targo Kalamees, Hanna Tietäväinen,
Kimmo Ruosteenoja, Juha Jokisalo, Reijo Hyvönen,
Simo Ilomets, Seppo Saku ja Asko Huttila

Name of project

REFI-A

Title

Test reference year 2012 for building energy demand and impacts of climate change

Abstract

The ongoing climate change is expected to affect the energy demand for heating and cooling of buildings. Building energy consumption is often assessed by simulation algorithms that require hourly meteorological data. For this purpose, weather observations from the year 1979 have previously been used in Finland as a reference. Here, we describe a new test reference year, TRY2012, that was constructed by using weather observations at three measurement stations (Vantaa, Jyväskylä and Sodankylä) during 1980–2009. TRY2012 consists of weather data for twelve months that originate from different calendar years, each month having weather conditions close to the long-term climatological average. The months for TRY2012 were selected using Finkelstein-Schafer parameters for four climatic variables (air temperature, humidity, solar radiation and wind speed); these parameters were weighted depending on how important individual climatic variables are for the building energy consumption in Finland. Calculations for two example buildings, a detached house and an office building, indicate that the most influential climatic variable for annual energy demand is air temperature. In summer, solar radiation and air temperature are of broadly equal influence.

We also assessed the influence of human-induced climate change on typical weather conditions for the years 2030, 2050 and 2100. Multi-model mean estimates from 7 to 19 global climate models, together with the TRY2012 weather data, were used to construct artificial meteorological data for the future. The projected reference year TRY2030 is 1.2–1.5°C warmer than TRY2012, with the lower end of the range corresponding to Vantaa in southern Finland and the higher value to Sodankylä in the north. Seasonal mean temperature is projected to increase by about two degrees in winter and by slightly less than one degree in summer. The variability in temperature will diminish in the winter half of the year by about 10 %. In addition, the projections include decreases in solar radiation in winter and spring, slight increases in wind speed in November–February, and small rises in relative air humidity in all seasons except summer.

Utilizing the reference years TRY2012 and TRY2030, we calculated the mean monthly and annual energy consumption for the two example buildings in the current and projected future climate. Based on the simulations, the heat energy consumption of spaces and ventilation will decrease by 10% for the detached house and by 10–13% for the office building, whereas space cooling electricity will increase by 17–19% for the detached house and by 13–15% for the office building. Because electricity for cooling relative to the total delivered energy is minor, the total energy consumption of the example buildings is projected to decrease by 4–7% by 2030.

Publishing unit

Climate Change (ILM)

Classification (UDK)

551.5, 551.582,
628.8, 644.1, 697.1

Keywords

Climate, climate change, building technology,
test reference year, heating energy, cooling energy

ISSN and series title

0782-6079 Raportteja - Rapporter – Reports
1796-7104 (nid.) 1796-7112 (pdf) Sitra Studies 53

ISBN

978-951-697-755-6 (paperback)
978-951-697-756-3 (pdf)

Language

Finnish (abstract in English)

Pages 110

Alkusanat

Rakennusten energiamääräykset ja -laskenta ovat uudistumassa vuonna 2012. Rakentamismääräyskokoelmaan kuuluvan osan ”D3 Rakennusten energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet 2012” (RakMk D3, 2012) liite 2 käsittelee lämmitystehon ja energiankulutuksen laskennassa käytettäviä säätietoja. Kyseinen liite korvaa vuonna 2007 käyttöön otetun ohjeiston ”D5 Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystarpeen laskenta” (RakMk D5, 2007) liitteen 1, jossa esitetyt sääaineistot pohjautuivat vuoden 1979 säähavaintoihin.

Tämä julkaisu on tutkimushankkeen ”Rakennusten energialaskennan ilmastolliset referenssi-vuodet (REFI-A)” loppuraportti. Tehtävänä oli uusien rakennusten energialaskennassa Suomessa käytettävät sääaineistot vuosien 1980–2009 havaintojen perusteella, tuottaa ilmastoskenaarioiden avulla rakennusten energialaskelmiin soveltuvat tulevaisuuden sääaineistot ja arvioida rakennusten energiankulutusta vuoden 2030 muuttuneessa ilmastossa.

Tässä raportoitavan tutkimuksen ohella toteutetaan toinen hanke, nimeltään ”Rakennusfysiikan ilmastollisten referenssi vuosien sääaineistot” (REFI-B). Kyseinen rinnakkaishanke tuottaa säämuuttujien aineistoja, joiden avulla Tampereen teknillisen yliopiston koordinoimassa FRAME-hankkeessa (Future envelope assemblies and HVAC solutions) kartoitetaan ilmastomuutoksen ja lisäeristämisen rakennuksille aiheuttamia mahdollisia riskejä. Näitä rakennusfysikaalisia tarkasteluja tukeva REFI-B –hanke keskittyy arvioimaan tämän vuosisadan puolivälin ja lopun ilmastollisia oloja, ja hankkeen tulokset raportoidaan pääosin erikseen. Poikkeuksena ovat vuosien 2050 ja 2100 arvioitua keskimääräistä ilmastoa kuvaavat rakennusten energialaskennan testivuodet, joita käytetään jäähdytysenergian tarvetta koskeviin laskelmiin FRAME-hankkeessa ja jotka myös esitellään lyhyesti tässä raportissa. Perusteluna on se, että arviot ilmastomuutumisesta vuosisadan puoliväliin ja loppuun mennessä laadittiin pääpiirteissään samoin menetelmin kuin vuodelle 2030.

Vuosina 2006–2010 toteutettuun Ilmastomuutoksen sopeutumistutkimusohjelmaan (ISTO) kuuluneessa ACCLIM-hankkeessa on syntynyt uutta tietoa Suomen tähänastisesta ilmastosta ääri-ilmiöineen sekä todennäköisyyssennusteina annettuja arvioita tulevan ilmastomuutoksen voimakkuudesta maassamme (Jylhä et al., 2009). Hankkeessa laaditut ilmastomuutoskkenaariot ovat lähtökohtana rakennusten energialaskelmiin soveltuvia tulevaisuuden sääaineistoja muodostettaessa. Kyseisen hankkeen tuloksia on nähtävissä verkkosivustolla, jonka osoite on ilmatieteenlaitos.fi/acclim-hanke.

Nyt raportoiva tutkimus on toteutettu Ympäristöministeriön (YM) ja Suomen itsenäisyyden juhlarahaston (Sitra) yritysrahoitusprojektina. Tutkimus on tehty Ilmatieteen laitoksen (IL) ja Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulun Energiatekniikan laitoksen (Aalto) yhteistyöhankkeena. Ilmatieteen laitoksessa tutkimusta on johtanut erikoistutkija Kirsti Jylhä ja Aalto-yliopistossa tutkija Juha Jokisalo. Tutkimuksesta on valmistunut myös tieteellinen julkaisu (Kalamees et al., 2011).

Tutkimuksen johtoryhmään kuuluivat:

Pekka Kalliomäki, Ympäristöministeriö;

Katja Outinen, Ympäristöministeriö;

Jarek Kurnitski, Suomen itsenäisyyden juhlarahasto Sitra;

Kirsti Jylhä, Ilmatieteen laitos;

Hanna Tietäväinen, Ilmatieteen laitos;

Reija Ruuhela, Ilmatieteen laitos;

Juha Jokisalo, Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulu;

Targo Kalamees, Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulu.

Raportin eri lukujen ja liitteiden pääasialliset kirjoittajat ovat:

Luku 1: Kirsti Jylhä, Targo Kalamees, Juha Jokisalo, Asko Hutila

Luku 2: Hanna Tietäväinen, Targo Kalamees, Juha Jokisalo

Luku 3: Targo Kalamees, Juha Jokisalo

Luku 4: Seppo Saku, Reijo Hyvönen, Hanna Tietäväinen

Luku 5: Targo Kalamees, Juha Jokisalo, Simo Ilomets

Luku 6: Hanna Tietäväinen, Kirsti Jylhä,

Luku 7: Kimmo Ruosteenoja, Kirsti Jylhä

Luku 8: Kimmo Ruosteenoja, Kirsti Jylhä

Luku 9: Kirsti Jylhä, Kimmo Ruosteenoja

Luku 10: Targo Kalamees, Juha Jokisalo

Luku 11: Kirsti Jylhä, Kimmo Ruosteenoja

Luku 12: Kirsti Jylhä, Targo Kalamees, Juha Jokisalo

Liite 1: Hanna Tietäväinen

Liite 2: Hanna Tietäväinen

Liite 3: Reijo Hyvönen, Seppo Saku, Hanna Tietäväinen

Liite 4: Targo Kalamees, Juha Jokisalo

Liite 5: Targo Kalamees, Juha Jokisalo

Liite 6: Hanna Tietäväinen, Kirsti Jylhä

Liite 7: Hanna Tietäväinen

Liite 8: Reijo Hyvönen

Liite 9: Kimmo Ruosteenoja

Liite 10: Kimmo Ruosteenoja

Liite 11: Kimmo Ruosteenoja, Kirsti Jylhä

Liite 12: Kimmo Ruosteenoja, Kirsti Jylhä

REFI-A -hankkeen verkkosivuston osoite on
ilmatieteenlaitos.fi/rakennusten-energialaskennan-testivuosi

Meteorologian ja ilmastotieteen termejä selityksineen on nähtävissä Ilmatieteen laitoksen verkkosivustolla Ilmakehä-ABC (ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-abc). Ilmastoa kuvaavat säämuuttujien (lämpötila, sademäärä, tuulen nopeus- ja suunta, ilman kosteus jne.) havainnoista lasketut pitkän ajan keskiarvot. Lämpötilaa ja muita säämuuttujia voidaankin nimittää myös ilmasto-
muuttujiksi. Tässä raportissa käytetään näiden rinnalla myös termejä sää- ja ilmastosuure.

Tutkimukseen perustuvaa ilmastonmuutostietoa on koottu yhtenäiseen muotoon Ilmatieteen laitoksen, Suomen ympäristökeskuksen ja Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulun Yhdyskuntasuunnittelun tutkimus- ja koulutuskeskuksen toteuttamaan Ilmasto-opas.fi – verkkopalveluun. Se sisältää myös käytännön työkaluja kunta- ja aluetason suunnitteluun ja päätöksentekoon. Lisäksi usein esitettyihin kysymyksiin säästä, ilmastosta ja ilmakehän ilmiöistä on annettu asiantuntijoiden vastauksia sivustolla ilmatieteenlaitos.fi/kysymyksia-ja-vastauksia. Säähavaintojen teosta kerrotaan verkkosivulla ilmatieteenlaitos.fi/saahavainnot ja ilmakehän mallinnuksesta sivulla ilmatieteenlaitos.fi/mallinnus.

Kiitämme johtoryhmän jäseniä ja heidän sijaisiaan, tutkimuksen rahoittajia sekä kaikkia tutkimuksen toteuttamiseen osallistuneita ja siinä avustaneita henkilöitä yhteistyöstä tutkimuksen aikana.

Helsingissä ja Espoossa

4.10.2011

Tekijät

Sisällysluettelo

1	Johdanto	8
1.1	Tausta ja tavoitteet	9
1.2	Ilmastonmuutos	10
1.3	Energialaskennan vanha testivuosi 1979	11
2	Energialaskennan ja mitoituslämpötilan vyöhykkeet	13
3	Lämmitysjärjestelmien mitoittava ulkoilman lämpötila	15
4	Meteorologiset suureet: havainnot ja laskenta	17
5	Energialaskennan testivuoden 2012 muodostaminen	18
5.1	Vaihe 1: Standardin mukainen menetelmä	18
5.2	Vaihe 2: Säämuuttujien painokertoimet	20
5.2.1	Painokertoimien määrittäminen esimerkkirakennusten avulla	22
5.2.2	Eri ilmastomuuttujien vaikutus rakennusten energiantarpeeseen	28
5.3	Vaihe 3: Muokattu standardi, menetelmä ja tulokset	31
5.4	Vaihe 4: Testivuoden tuntiaineistot ja eri kuukausien liittäminen yhteen	34
6	Rakennusten uusi energialaskennan testivuosi 2012	37
6.1	Uudet sääaineistot	37
6.2	Uuden testivuoden vertailu vuosiin 1979 ja 1980-2009	39
7	Energialaskennan tulevaisuuden testivuoden laadinta	42
7.1	Kasvihuonekaasujen skenaariot ja ilmastomallit	42
7.2	Ilmastonmuutoksen arvioiminen	43
7.2.1	Ilman lämpötila	44
7.2.2	Auringon säteily	44
7.2.3	Suhteellinen kosteus	45
7.2.4	Tuulen nopeus ja suunta	45
8	Ilmastonmuutoksen arvioitu vaikutus energialaskennan sääsuureisiin	46
8.1	Ilmaston keskimääräiset muutokset	46
8.1.1	Pitkän aikavälin trendit	47
8.1.2	Muutokset testivuodelle 2030	48
8.2	Lämpötilan hetkellisten arvojen muutokset	51

9	Tulevaisuuden testivuodet	53
9.1	Keskimääräinen ilmasto	53
9.2	Ilmastosuureiden frekvenssijakaumia	54
10	Energialaskelmat testivuosilla 2012 ja 2030	56
11	Testivuosien tarkastelua niiden käytön kannalta	59
11.1	Nykyisen ilmaston uusi testivuosi	59
11.2	Tulevaisuuden ilmaston testivuodet	61
12	Yhteenveto	62
	Kirjallisuusviitteet	65
	Liitteet	67
	Liite 1. Lämmitystarvelukujen laskeminen	67
	Liite 2. Uusi vyöhykejako: täydentävää tietoa	68
	Liite 3. Puuttuvat havainnot ja säteilysuureiden laskenta	69
	Liite 4. Standardin mukaisten testikuukausien valinta	73
	Liite 5. Eri ilmastosuureiden vaikutus rakennuksen lämmitys- ja jäähdytysenergian tarpeeseen vyöhykkeillä III ja IV	75
	Liite 6. Uusi testivuosi: lisätietoa	78
	Liite 7. Ilman lämpötilan pysyvyyssarvot	83
	Liite 8. Auringon kokonaissäteilyenergia erisuuntaisille pinnoille	86
	Liite 9. Tutkimuksessa käytetyt ilmastomallit	92
	Liite 10. Tulevaisuuden testivuosien laadinnan yksityiskohdat	93
	Liite 11. Ilmaston muutokset: täydentävää tietoa	99
	Liite 12. Tulevaisuuden testivuodet: lisäkuvia vyöhykkeille III ja IV	105

1 Johdanto

1.1 Tausta ja tavoitteet

Suomen ilmastossa rakennuksia on lämmitettävä sisätilojen pitämiseksi toimivina ja viihtyisinä. Rakennusten energiatehokkuuden parantaminen on tärkeä keino, kun pyritään saavuttamaan Suomea koskevat kasvihuonekaasupäästöjen vähennystavoitteet ja näin osaltaan hillitsemään ilmastonmuutosta. Toisaalta ilmaston lämpeneminen vaikuttaa rakennusten lämmitys- ja jäähdytysenergian tarpeeseen.

Rakennuksen vuotuista lämmitys- ja jäähdytysenergian kulutusta voidaan arvioida joko rakennuksen kuukausittaisen lämpötaseen perusteella tai energiantarvetta sekä sisäilman laatua ja lämpöoloja (ns. sisäilmasto) päivästä toiseen simuloivilla laskentaohjelmilla. Jälkimmäinen tapa on yleistynyt, sillä simulointien avulla saadaan aiempaa tarkempia arvioita sekä rakennusten sisäilmastosta että energian käytöstä ja mahdollisuuksista säästää energiaa. Entistä paremmat työkalut vaativat kuitenkin myös aiempaa tarkempia lähtötietoja.

Rakennuksen ulkopuolella vallitsevat sääolot ovat olennainen lähtötieto arvioitaessa lämmitys- ja jäähdytysenergian tarvetta. Koska simulointiohjelmien aika-askeleena on tavallisesti yksi tunti, myös säätietoja tarvitaan näin tiheästi. Sääolot vaihtelevat vuodesta toiseen, mutta riittävän pitkien säähavaintoaikasarjojen avulla saadaan selville tarkasteltavalla paikkakunnalla keskimäärin vallitseva ilmasto. Myös rakennusten todellinen energiankulutus vaihtelee sääolojen mukana vuodesta toiseen, mutta energialaskentaan käytettävien säätietojen tulisi kuvata mahdollisimman hyvin paikkakunnan keskimääräisiä ilmastollisia oloja.

Suomessa tähän asti käytössä ollut energialaskennan säätietojen testivuosi pohjautuu vuoden 1979 säähavaintoihin Helsinki-Vantaan lentoasemalla, Jokioisten observatoriossa, Jyväskylän lentoasemalla ja Lapin ilmatieteellisessä tutkimuskeskuksessa Sodankylässä. Nämä Ilmatieteen laitoksen säähavaintoasemat edustavat neljää ilmastovyöhykettä, joihin Suomi on jaettu energiankulutuksen laskentaa varten. Vuoden 1979 valinnasta testivuodeksi on kulunut jo lähes 25 vuotta (Tammelin ja Erkiö, 1987). Sittemmin rakennusten energialaskennassa käytettävien säätietojen laadintaa varten on kehitetty ISO-standardi (SFS EN ISO 15927-4, 2005), jota on sovellettu mm. Virossa ja Islannissa (Kalamees ja Kurnitski, 2006; Kragh et al., 2005). Kyseisen standardin myötä ja maamme ilmaston asteittaisen lämpenemisen (Tietäväinen et al., 2010) takia on syytä päivittää energialaskennassa käytetyt säätiedot ottaen huomioon myös aivan viime vuosien säähavainnot.

Tämän tutkimuksen päätavoitteena oli ensinnäkin kehittää rakennusten energiankulutuksen laskentaa varten nykyistä ilmastoa vastaava uusi testivuosi (TRY2012) säätietoineen. Toisena päätavoitteena oli laatia tulevaisuuden testivuosi (TRY2030) sen arvioimiseksi, miten Suomen ilmaston muuttuminen vaikuttaa rakennusten energiantarpeeseen lähivuosikymmeninä. Uusi testivuosi TRY2012 muodostettiin vuosien 1980–2009 säähavaintotietojen avulla. Tulevaisuuden testivuoden TRY2030 perustana ovat maailmanlaajuisten ilmastomallien simuloimat Suomen ilmaston muutokset (Jylhä et al., 2009). Tutkimuksen sisältyivät seuraavat välivaiheet:

- Arvioitiin tarvetta päivittää energialaskennan tähänastinen testivuosi, rakennusten lämmitysjärjestelmien mitoituslämpötilat sekä tarkasteluissa käytettävä Suomen jaoteltu ilmastollisiin vyöhykkeisiin.
- Selvitettiin, miten eri ilmastosuureet (lämpötila, säteily, kosteus, tuuli) vaikuttavat rakennusten energiankulutukseen.
- Valittiin energiankulutuksen laskennan uusi testivuosi kullekin ilmastovyöhykkeelle ja laadettiin niille tunnitaiset säätietokannat.

- Arvioitiin ilmaston muuttumista ja laadittiin vuoden 2030 ilmasto kuvaava testivuosi. Samalla testivuodet kehitettiin myös vuosille 2050 ja 2100.
- Arvioitiin ilmastomuutoksen vaikutusta rakennusten energiankulutukseen lähivuosikymmeninä.

1.2 Ilmastomuutos

Ilmakehän hiilidioksidipitoisuus on noussut yli 105 ppm teollistumista edeltävältä tasolta ja oli vuonna 2010 noin 389 ppm (Conway & Tans, 2011). Fossiilisten polttoaineiden käytöstä, sementin tuotannosta ja maankäytön muutoksista (lähinnä metsien hävityksestä) aiheutuvat CO₂-päästöt olivat 27 % suurempia vuonna 2008 kuin vuonna 1990 (Allison et al., 2009). Päästöjen seurauksena ilmakehän CO₂-pitoisuus on kasvanut vuosina 1980–2010 keskimäärin 1,69±0,58 ppm/vuosi (Blunden et al., 2011). Päästöistä hieman yli puolet sitoutuu valtameriin ja maaperään, mutta tämä osuus on todennäköisesti pienemässä, mikä sekin jatkossa kiihdyttää pitoisuuksien nousua ilmakehässä.

Havaintojen mukaan maapallon keskilämpötila on noussut 0,76°C (0,57–0,95°C) jaksosta 1850-1899 jaksoon 2001–2005 (IPCC, 2007). Vuodesta 1970 muutos on ollut noin 0,16 °C vuosikymmenessä (Blunden et al., 2011), ja lämpenemisen ennustetaan keskimäärin jatkuvan oleellisesti samansuuruisena myös lähivuosikymmeninä (IPCC, 2007). Ilmaston luonnollisen vaihtelun takia on kuitenkin odotettavissa, että lämpeneminen välillä kiihtyy, välillä hidastuu. Esimerkiksi Tyynen valtameren El Niño -vaihe voi nostaa maapallon keskilämpötilaa jopa 0,2 astetta muutaman vuoden ajaksi. Vastakkainen La Niña -vaihe puolestaan lyhytaikaisesti viilentää maapallon keskilämpötilaa. Eniten tämä usean vuoden jaksolla toistuva valtameren ja ilmakehän heilahtelu (ns. ENSO) vaikuttaa matalilla leveysasteilla.

Kasvihuoneilmion voimistumisen aiheuttama lämpeneminen jakaantuu epätasaisesti eri puolille maapalloa. Nopeimmin lämpenevät mantereet ja pohjoinen napa-alue, hitaimmin Etelämannerta ympäröivä meri ja Atlantin pohjoisosat. Tämä ilmastomallien ennustama muutosten maantieteellinen jakauma on sopuoinnussa sen kanssa, mitä viime vuosikymmeninä on havaittu (IPCC, 2007).

Pohjois-Euroopan talvilämpötiloihin vaikuttaa niin nykyisessä kuin tulevassakin ilmastossa se, kuinka voimakkaat länsivirtaukset vallitsevat ilmakehässä Pohjois-Atlantin yllä eli millaisessa vaiheessa on ns. Pohjois-Atlantin värähtely (NAO). Länsituulten kuljettamat matalapaineet tuovat mukanaan lämpöä, tuulia ja sateita. On viitteitä siitä, että ilmastomuutoksen myötä länsivirtaukset keskimäärin voimistuisivat ja NAO-indeksi olisi nykyistä enemmän positiivisessa vaiheessa. Positiivisen NAO-indeksin talvet ovat tulevaisuudessakin Pohjolassa leudompia kuin negatiivisen indeksin talvet, mutta kutakin NAO-indeksin arvoa vastaa korkeampi talvilämpötila kuin nykyisin. Keskimäärin, eli 30 vuoden keskiarvoina, tulevaisuuden talvet ovat ilmastomallitulosten mukaan selvästi nykyisiä lämpimämpiä.

Suomessa vuoden keskilämpötila on havaintojen mukaan noussut viimeisen sadan vuoden aikana (1909–2008) noin 0,9 °C (Tietäväinen et al., 2010). Lämpeneminen on tilastollisesti merkitsevää myös keväällä (1,6 °C) ja kesällä (0,7 °C). Lyhyempää ajanjaksoa tarkasteltaessa ilmenee, että etenkin talvet ovat lämmenneet huomattavasti: 3,5 °C (0,7°C/10v) viidenkymmenen viime vuoden aikana (1959-2008). Toisaalta talvet 2009/2010 ja 2010/2011 ovat muistutus siitä, että koko maassa voi yhä esiintyä kylmiäkin talvia.

Lämpötilan nousu lyhentää lämmityskautta sekä vähentää lämmityksen ja lisää jäähdytyksen tarvetta. Aiempien arvioiden mukaan lämmitysenergian tarve Suomessa tulisi vuoteen 2050 mennessä vähenemään 10–14 % vuosiin 1961–1990 verrattuna (Venäläinen et al., 2004a), ja jäähdytystarve voisi lisääntyä 10 % vuoteen 2030 mennessä ja 20–30 % vuoteen 2080 men-

nessä (Carter ja Kankaanpää, 2003). Huolimatta ilmaston keskimääräisestä lämpenemisestä myös tulevana vuosikymmeninä esiintyy kuitenkin kylmiä jaksoja, joiden aikana lämmitysenergiaa tarvitaan runsaasti (Vajda et al., 2003).

Nyt esitettävässä REFI-A -tutkimuksessa ilmastonmuutosta koskevien arvioiden lähtökohtana olivat ISTO-sopeutumistutkimusohjelmaan kuuluneessa ACCLIM-hankkeessa laaditut ilmastomuutoskenaariot (Jylhä et al., 2009). Näihin palataan luvussa 7.

1.3 Energialaskennan vanha testivuosi 1979

Vuonna 2007 Ympäristöministeriön Asunto- ja rakennusosasto julkaisi sarjassaan ”Suomen rakentamismääräyskokoelma” ohjeen ”Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehotarpeen laskenta” (RakMk D5, 2007). Ohjeen energialaskelmissa Suomi on jaettu neljään hallinnollisia rajoja noudattavaan ilmastolliseen vyöhykkeeseen (I–IV), joita kutakin edustaa yksi säähavaintoasema (taulukko 1.1). Ohjeessa käytetään säätietoina Tammelinin ja Erkiön (1987) valitsemaa energialaskennan testivuosiaineistoa, joka pohjautuu vuoden 1979 säähavaintoihin. Testivuoden valinta tehtiin tuolloin 16 vuoden (1968–1983) joukosta. Vuodet ovat kuitenkin sääoloiltaan varsin erilaisia, eikä yksittäinen vuosi voi edustaa kovinkaan hyvin keskimääräistä ilmastoa. Tämän takia ilmastotilastot perustuvat yleensä vähintään 30 vuoden säähavaintoihin, kuten vuosina 1971–2000 tehtyihin mittauksiin (Drebs et al., 2002).

Taulukko 1.1. Energialaskennan testivuotta 1979 luotaessa käytetyt säähavaintoasemat vyöhykkeittäin, niiden maantieteelliset koordinaatit ja korkeus merenpinnasta sekä keskilämpötilat vuonna 1979 sekä keskimäärin jaksoina 1971–2000 ja 1980–2009.

Vyöhyke	Havaintoasema	Sijainti	Korkeus (m)	Keskilämpötila (°C)		
				1979	1971– 2000	1980– 2009
I	Helsinki-Vantaan lentoasema	60°19'N, 24°57'E	51	4,3	4,9	5,3
II	Jokioinen, observatorio	60°48'N, 23°30'E	104	3,7	4,3	4,6
III	Jyväskylä, lentoasema	62°24'N, 25°40'E	139	2,8	2,9	3,2
IV	Sodankylä, observatorio*	67°21'N, 26°37'E	179	-0,8	-0,8	-0,4

* Nykyisin Sodankylä, Lapin ilmatieteellinen tutkimuskeskus

Testivuoden 1979 sääolojen vertailu 30-vuotisjaksoon 1971–2000 osoitti, että kyseisen vuoden keskilämpötila oli varsin lähellä pitkän ajan keskiarvoa, vaikkakin Etelä-Suomessa jonkin verran tavanomaista kylmempi (taulukko 1.1). Kuukausikohtaisesti vuoden 1979 keskilämpötiloissa oli kuitenkin isoja poikkeamia keskimääräisestä molempiin suuntiin. Tammi- ja helmikuu olivat selvästi tavanomaista kylmempiä. Testivuoden touko–kesäkuu ja elokuu olivat puolestaan keskimääräistä lämpimämpiä, mutta heinäkuu taas tavanomaista viileämpi. Tosin Sodankylässä myös heinäkuu oli keskimääräistä lämpimämpi. Loppuvuoden aikana syys–lokakuu ja muualla paitsi Sodankylässä myös joulukuu olivat jonkin verran tavanomaista kylmempiä, kun taas marraskuu oli tavanomaista lämpimämpi.

Vuoden 1979 jääminen pitkän ajan keskiarvoja kylmemmäksi etenkin Etelä-Suomessa käy ilmi myös lämmitystarveluvuista, jotka laskettiin liitteessä 1 esitetyllä menetelmällä 17 asteen sisälämpötiloille. Vuoden 1979 lämmitystarveluku oli Vantaalla 5 % ja Jyväskylässä 1 % suurempi kuin pitkän ajan (1971–2000) keskimääräiset lämmitystarveluvut.

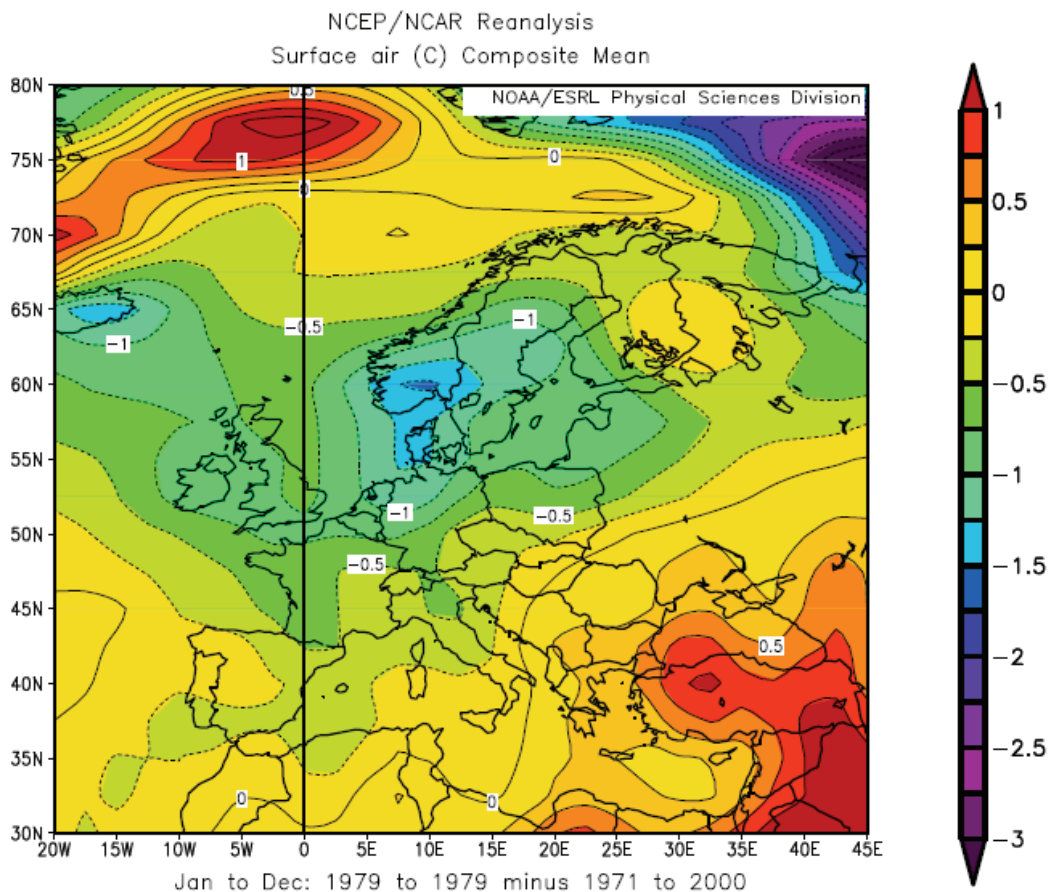
Tammikuun ja helmikuun kylmyyden lisäksi vuoden 1979 soveltuvuutta rakennusten energialaskelmiin huonontaa se, että kyseisen vuoden heinäkuu oli maan etelä- ja keskiosassa viileä ja sateinen. Niinpä käytettäessä kesäajan energialaskelmissa vuoden 1979 sääaineistoa

saadaan maan etelä- ja keskiosaan suurempi lämmitysenergian ja pienempi jäädytysenergian kulutus kuin keskimäärin jaksolla 1971–2000.

Kuvassa 1.1 on esitetty koko vuoden 1979 keskilämpötilan poikkeama pitkäaikaisesta keskiarvosta (1971–2000) Euroopan alueella. Vuosi 1979 oli Pohjois-Euroopassa tavanomaista kylmempi. Suurimmat poikkeamat esiintyivät Etelä- ja Keski-Skandinaviassa ja Pohjois-Venäjällä. Suomessa suhteellisesti kylmintä oli maan lounaisosassa. Vuosi 1979 oli suuressa osassa Eurooppaa tavanomaista sateisempi, ja Suomessa sateisinta oli maan keskivaiheilla.

Vuoden 1979 säässä oli siis useita piirteitä, jotka tekevät siitä poikkeavan verrattuna pitkäaikaisiin keskiarvoihin. Huomattavimmat poikkeamat ovat vuoden alun kylmyys sekä heinäkuun viileys ja sateisuus. Suomessa säät ovat tyypillisesti sangen vaihtelevia, ja keskimääräisiä arvoja löytyy vain tilastoista. Käytännössä on jokseenkin mahdotonta löytää sellaista yksittäistä vuotta, joka kuukaudesta toiseen kuvaisi keskimääräisiä oloja, sillä jokaiseen vuoteen mahtuu sekä lämpimiä ja kylmiä kuten myös sateisia ja kuivia jaksoja, jotka aiheuttavat suuriakin poikkeamia pitkäaikaisiin keskiarvoihin verrattuna. Tämän takia tässä raportissa energialaskennan uusi testivuosi kullekin paikkakunnalle muodostetaan yhdistämällä eri vuosien kuukausia, jotta se kuvaisi paremmin keskimääräisiä sääoloja.

Vanhaa testivuotta 1979 on verrattu valittavaan uuteen testivuoteen TRY2012 ja sen perustana olevaan 30-vuotisjaksoon 1980–2009 luvussa 6 ja liitteessä 6.

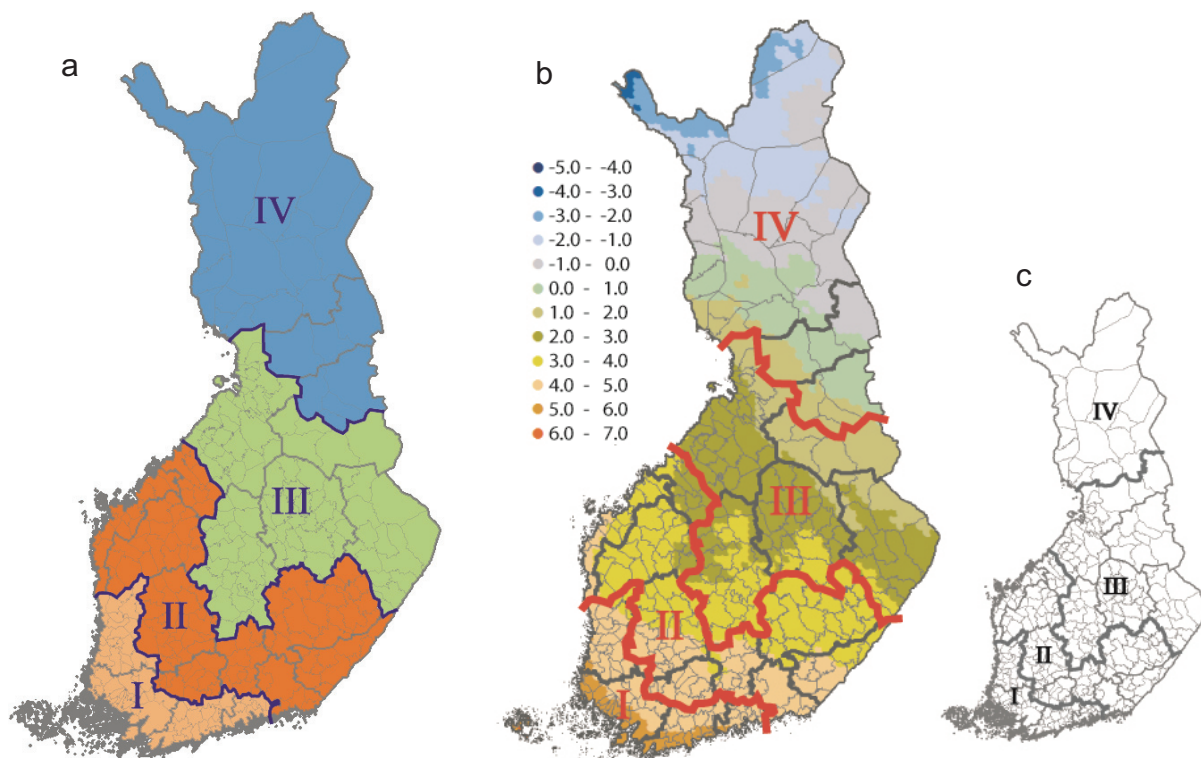


Kuva 1.1. Vuoden 1979 keskilämpötilan poikkeama (°C) pitkäaikaisesta keskiarvosta (1971–2000) Euroopassa. Siniset ja vihertävät alueet ovat selvästi keskimääräistä viileämpiä, punaiset lämpimämpiä (Kistler et al., 2001).

2 Energialaskennan ja mitoituslämpötilan vyöhykkeet

Suomen rakentamismääräyskokoelmaan sisältyvässä, vuonna 2007 annetussa ohjeessa rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskennasta (RakMk D5, 2007) maamme on jaettu neljään lämpötilavyöhykkeeseen (kuva 2.1c), joita kutakin edustaa yksi Ilmatieteen laitoksen säähavaintoasema (taulukko 1.1). Tämä aluejako tarkistettiin tutkimuksen alkuvaiheessa käyttäen säähavaintoja viimeisen 30 vuoden ajalta (1980–2009).

Valitsemalla tutkittavaksi kausi 1980–2009 saatiin tarkasteluihin mukaan myös kaikkein tuoreimmat säähavainnot. Ilmastotutkimuksessa laajasti käytetty perusjakso on 1971–2000 (Drebs et al., 2002), ja siihen verrattuna kauden 1980–2009 vuosikeskilämpötila oli Vantaalla sekä Sodankylässä 0,4 °C ja Jokioisissa ja Jyväskylässä 0,3 °C lämpimämpi (taulukko 1.1). Kahden jakson kuukausikeskilämpötilojen erot olivat suurimmillaan huhtikuussa: 0,9 °C Jokioisissa ja 0,7 °C muilla paikkakunnilla. Erityisesti Sodankylässä myös loppusyksy ja alkutalvi (loka–tammikuu) ovat jälkimmäisellä kaudella lämpimämpiä. Pienimmillään erot olivat helmi–maaliskuussa sekä kesäkuussa, ja muista kalenterikuukausista poiketen maaliskuu Sodankylässä sekä kesäkuu Jokioisissa ja Jyväskylässä olivatkin jaksolla 1980–2009 kylmempiä kuin keskimäärin vuosina 1971–2000.



Kuva 2.1. a: Rakennusten energialaskentaan ehdotettu uusi aluejako. Vyöhykkeet I–IV on esitetty eri väreillä. b: Kuten kuva a, paitsi että taustakarttana on keskimääräinen vuosikeskilämpötila (°C) jaksolla 1980–2009. Vyöhykkeiden väliset rajat on esitetty punaisella. c: Energiankulutuksen laskennassa aiemmin käytetty aluejako (RakMk D5, 2007).

Vyöhykejaon toimivuutta arviointiin vuosikeskilämpötilan alueellisen jakauman perusteella. Koska vuosikeskilämpötilan erot kausien 1971–2000 ja 1980–2009 välillä olivat lähes samat kaikilla neljällä havaintoasemalla (taulukko 1.1), käytetyn kauden vaikutus aluejaon tarkasteluun on vähäinen. Kuvan 2.1b taustakartta esittää Venäläisen et al. (2005) kuvaamalla menetelmällä laadittua jakaumaa v. 1990–2009. Näistä 10 km x 10 km:n paikallisella erotuskyvylle esitetyistä keskilämpötiloista vähennettiin vuorollaan kunkin neljän havaintoaseman

keskilämpötilat. Saadut poikkeamakartat on esitetty liitteessä 2. Seuraavaksi tarkasteltiin silmämääräisesti, kuinka hyvin itseisarvoltaan enintään 2 °C poikkeaman alueet ja tähän asti käytetty vyöhykejako (kuva 2.1c) vastaavat toisiaan. Vertailun perusteella päädyttiin kuvan 2.1a mukaiseen uuteen aluejakoon, joka noudattaa maakuntien tai vähintään kuntien rajoja.

- Vyöhyke I: Uudenmaan, Varsinais-Suomen, Satakunnan ja Ahvenanmaan maakunnat.
- Vyöhyke II: Kymenlaakson, Etelä-Savon, Etelä-Karjalan, Päijät-Hämeen, Kanta-Hämeen, Pirkanmaan, Etelä-Pohjanmaan, Pohjanmaan ja Keski-Pohjanmaan maakunnat.
- Vyöhyke III: Keski-Suomen, Pohjois-Savon, Pohjois-Karjalan, Kainuun ja Pohjois-Pohjanmaan maakunnat pois lukien seuraavat kunnat: Ristijärvi, Hyrynsalmi, Puolanka, Suomussalmi, Pudasjärvi, Taivalkoski ja Kuusamo.
- Vyöhyke IV: Lapin maakunta sekä seuraavat Pohjois-Pohjanmaan ja Kainuun kunnat: Ristijärvi, Hyrynsalmi, Puolanka, Suomussalmi, Pudasjärvi, Taivalkoski ja Kuusamo.

Jyväskylä on vyöhykkeeseen III nähden lämmin, joten suurin osa vyöhykkeestä on vuosikeskilämpötilaltaan havaintoasemaa kylmempi. Jyväskylän havaintoasema tarjoaa kuitenkin maan keskiosasta kattavimmat saatavissa olevat ilmastoaikasarjat, minkä tähden sen valinta vyöhykettä edustavaksi havaintoasemaksi on perusteltua.

Kainuun pohjoisosassa ja Koillismaalla ero Jyväskylän vuosikeskilämpötilaan ylittää 2 °C, ja suurimmillaan ero Koillismaalla on yli 3 °C. Tämän takia vyöhykkeen III pohjoisrajaa muutettiin siten, että seitsemän Kainuun ja Pohjois-Pohjanmaan kuntaa siirrettiin aiemman vyöhykejaon mukaisesta vyöhykkeestä III (kuva 2.1c) vyöhykkeeseen IV (kuva 2.1a).

Sodankylä jakaa vyöhykkeen IV kahtia siten, että sen eteläpuolella vuosikeskilämpötilat ovat korkeampia ja pohjoispuolella (ja itäpuolella) alempia kuin Sodankylässä. Pienellä alueella pohjoisrajan tuntumassa ja Käsivarressa ero Sodankylän vuosikeskilämpötilaan on yli 2 °C.

Koska ero kahden eteläisimmän vyöhykkeen (I ja II) vuosikeskilämpötilojen välillä on pieni, päätettiin, että molemmissa vyöhykkeissä voidaan käyttää samaa energialaskennan testivuotta. Tilastokeskuksen tietokannan avulla selvitettiin, miten Suomen rakennuskanta jakaantuu eri lämpötilavyöhykkeiden välillä, kun vyöhykkeet I–II yhdistetään tai kaikki neljä vyöhykettä pidetään erillään (taulukko 2.1). Koska vyöhykkeellä I rakennusten kerrosala on suurempi kuin vyöhykkeellä II, Vantaalla sijaitseva Helsinki-Vantaan lentoaseman havaintoasema valittiin edustamaan molempia vyöhykkeitä.

Taulukko 2.1. Suomen rakennuskannan jakaantuminen eri vyöhykkeiden välillä käytettäessä ehdotetun mukaista uutta vyöhykejakoa (Tilastokeskus, 2009).

Vyöhyke	Vyöhykkeet I ja II yhdistettynä energialaskennan testivuotta vasten		Vyöhykkeet erikseen mitoittavaa ulkoilman lämpötilaa varten	
	Rakennuksia	Kerrosala, m ²	Rakennuksia	Kerrosala, m ²
I			32 %	41 %
II	70 %	75%	37 %	34 %
III	24 %	20 %	24 %	20 %
IV	6 %	5 %	6 %	5 %

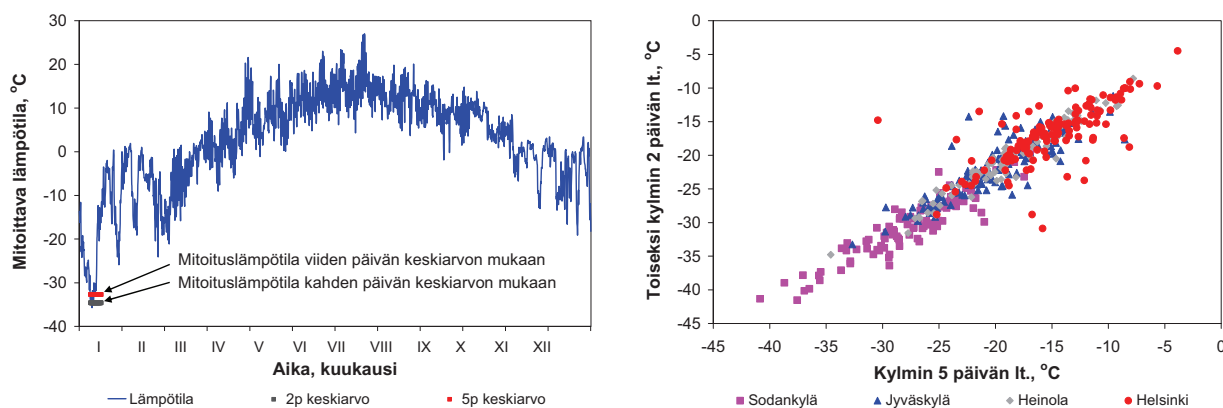
Energialaskennan uuden testivuoden TRY2012 aineistot laaditaan siis Vantaan säätietojen perusteella yhdistetylle vyöhykkeelle I–II, Jyväskylän perusteella vyöhykkeelle III ja Sodankylän säätiedoista vyöhykkeelle IV. Alueilla I–II sijaitsee $\frac{3}{4}$ Suomen rakennuskannasta (taulukko 2.1). Niinpä kun tarkoituksena on osoittaa, ovatko rakennukset energiatehokkuudeltaan määräysten mukaisia, testivuoden TRY2012 aineistoista tehtävään soveltuvat parhaiten Vantaan säätiedot.

Huomattakoon, että vaikka vyöhykkeillä I ja II on jatkossa käytössä sama energialaskennan testivuoden sääaineisto, niin rakennusten lämmitysjärjestelmien mitoituksessa käytetään edelleen neljää eri mitoituslämpötilaa, kutakin eri vyöhykkeelle (luku 3).

3 Lämmitysjärjestelmien mitoittava ulkoilman lämpötila

Energialaskennan testivuoden laatimisen ohella selvitimme, tulisiko rakennusten lämmitysjärjestelmien mitoituslämpötiloja Suomessa nostaa jo tapahtuneen ilmastonmuutoksen vuoksi. Mitoituslämpötiloina käytetään yleensä matalaa ulkoilman lämpötilaa riittävän lyhyen ajanjakson yli laskettuna keskiarvona. Eri maissa kyseisen ajanjakson pituus on tavallisesti Suomessa käytetyn kahden vuorokauden (LVTY, 1966) ja Venäjällä käytetyn viiden vuorokauden (SNiP II-A.6-72, 1973) välillä. Ruotsin (SS 02 43 10, 1991) ja Viron vanhemmassa menetelmässä (Saksakulm, 1996) ajanjakson pituutta valittaessa otettiin huomioon rakennuksen terminen massa, mikä mahdollistaa mitoittavan lämpötilan tarkemman määrittelyn. Toisaalta näiden menetelmien haittapuolina ovat monimutkaisuus ja se, että rakennuksen eri osissa terminen massa voi olla erilainen.

Mitoittavien lämpötilojen määrittämistä havainnollistavat kuvat 3.1 ja 3.2. Ensimmäisessä kuvassa vasemmalla on esitetty vuorokauden keskilämpötilat Helsingissä vuonna 1987 sekä kyseistä vuotta vastaava mitoituslämpötilan etsinnässä käytetty kylmä jakso määritettynä joko kahden tai viiden vuorokauden keskilämpötilojen perusteella. Edellisessä menetelmässä mitoittava lämpötila määräytyy toiseksi matalimman kahden vuorokauden keskilämpötilan (LVTY, 1966) ja jälkimmäisessä menetelmässä (SNiP II-A.6-72, 1973) kaikkein matalimman viiden vuorokauden keskilämpötilan perustella. Neljän havaintoaseman tulosten mukaan kahden vuorokauden menetelmän mukaiset lämpötilat olisivat hieman alempia kuin viiden vuorokauden menetelmällä saadut (kuvan 3.1 oikeanpuoleinen kaavio).



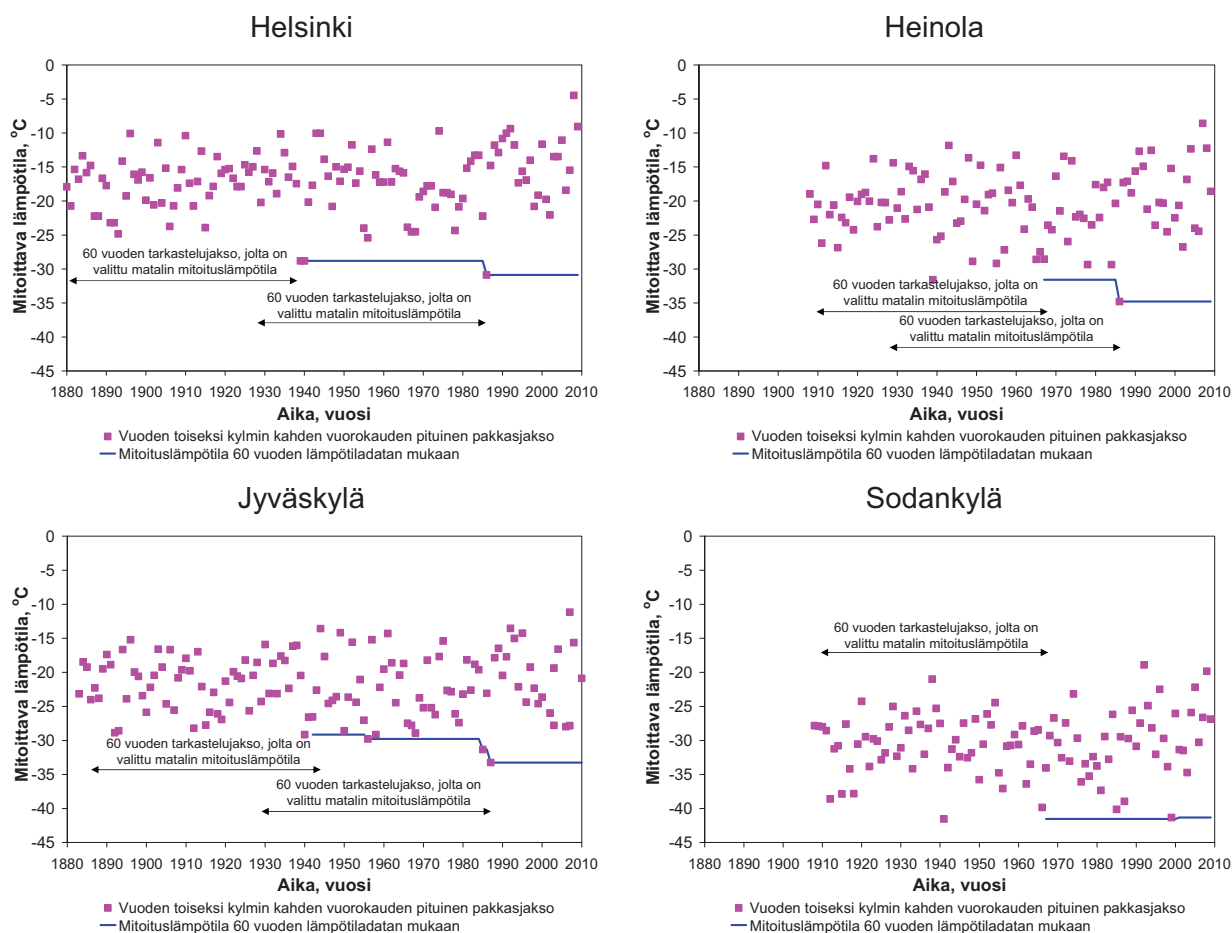
Kuva 3.1. (Vasen) Vuorokauden keskilämpötilat Helsingissä vuonna 1987. Nuolet osoittavat toiseksi alinta kahden vuorokauden ja kaikkein alinta viiden vuorokauden keskilämpötilaa. (Oikea) Vuoden toiseksi alimmat kahden vuorokauden (pysty akseli) ja kaikkein alimmat viiden vuorokauden (vaaka-akseli) keskilämpötilat neljällä havaintoasemalla laskettuina taulukon 3.1 mukaisten ajanjaksojen jokaiselle vuodelle.

Suomen nykyisissä rakentamismääräyksissä käytetyt mitoittavat lämpötilat (RakMk D5, 2007) perustuvat vuonna 1966 määritettyihin mitoituslämpötiloihin (LVTY, 1966). Niiden ajantasaisuuden tarkistamiseksi sovellettiin samaa menetelmää kuin mitä oli käytetty vuonna 1966, eli tarkasteltiin vuoden toiseksi kylmintä kahden vuorokauden pituista pakkasjaksoa 60 vuoden aikana. Kuuden vuosikymmenen pituinen tarkastelujakso on verrattain pitkä rakennuksen käyttöikänsä (RakMk A4, 2000) nähden (yleensä 50 vuotta), mutta varsin hyvin

perusteltavissa ääriämpötiloja tarkasteltaessa. Todennäköinen syy 60 vuoden jakson valintaan oli vuonna 1966 käytettävissä olleiden säätietojen saatavuus. Tarkastelupaikkakunnilta tai niitä mahdollisimman hyvin vastaavilta mittausasemilta oli saatavilla tätä tutkimusta varten kolme kertaa vuorokaudessa tehtyjä lämpötilahavaintoja taulukon 3.1 mukaisesti.

Taulukko 3.1. Lämpötilan havaintoaikasarjat mitoittavan ulkolämpötilan tarkastelua varten.

Havaintoasema	Aikasarjan pituus, vuotta	Ajanjakso
Helsinki, keskusta (Vantaan asemesta)	130	1.1.1880...31.12.2009
Heinola (Jokioisten asemesta)	102	1.10.1908...31.12.2009
Jyväskylä	127	1.1.1883...31.12.2009
Sodankylä	102	1.1.1908...31.12.2009



Kuva 3.2. Kunkin vuoden toiseksi kylmimmän kahden vuorokauden pituisen pakkasjakson keskilämpötila (lilat neliöt). Mitoituslämpötilat (siniset janat) on määritetty etsimällä kutakin ajanhetkeä edeltäneen 60-vuotijakson kylmin tällainen pakkasjakso. Koska tarkastelujakson pituus on 60 vuotta, ensimmäinen arvo saadaan vasta 60 vuotta aikasarjan alun jälkeen.

Kuvassa 3.2 on esitetty vuoden toiseksi alin kahden vuorokauden keskilämpötila vuosittain koko havaintojaksolta ja aikasarjoista määritetyt mitoituslämpötilat neljällä paikkakunnalla. Tulokset eivät osoita mitoittavan lämpötilan nousua. Alkuvuoden 1987 erittäin kylmän jakson (8.–12.1.) takia mitoittava ulkoilman lämpötila on Etelä-Suomessa pikemminkin laskenut kuin noussut. Pohjois- ja Keski-Lapissa oli tammikuun 1999 lopussa oli noin viikon ajan 45–50 asteen huippupakkasia, eikä mitoittavan lämpötilan nousua ole sen tähden havaittavissa myöskään Sodankylässä.

Nykyiset, rakentamismääräyksissä annetut mitoittavat ulkoilman lämpötilat (RakMk D5, 2007) sekä jakson 1950–2010 perusteella määritetyt mitoituslämpötilat on esitetty taulukossa 3.2. Jälkimmäisiin vaikuttaa suuresti kaksi poikkeuksellisen kylmää jaksoa (tammikuina 1987 ja 1999). Voidaan todeta, että mitoituslämpötiloja ei ole tarvetta vielä nostaa, joten ne voidaan säilyttää ennallaan (taulukon 3.2. keskimäinen sarake). Mitoituslämpötiloja lienee syytä leudontaa vasta pitkällä tähtäimellä; tähän palataan luvun 8.2 lopussa.

Taulukko 3.2 Mitoittava ulkoilman lämpötila nykyisten rakentamismääräysten mukaan (RakMk D5, 2007) sekä vuosien 1950–2010 säähavaintoihin perustuen (vyöhykkeellä I Helsingin ja vyöhykkeellä II Heinolan havaintojen nojalla).

Vyöhyke	Mitoittava ulkoilman lämpötila, °C	
	RakMk D5 (2007)	1950–2010
I (Helsinki Vantaan asemesta)	-26	-31
II (Heinola Jokioisten asemesta)	-29	-35
III (Jyväskylä)	-32	-33
IV (Sodankylä)	-38	-41

4 Meteorologiset suureet: havainnot ja laskenta

Energialaskennan uuden testivuoden valintaa varten laadittiin säätietokanta, joka koostui kolmella havaintoasemalla (Vantaa, Jyväskylä, Sodankylä) kolmen tunnin välein v. 1980–2009 mitatuista ilman lämpötilan T , suhteellisen kosteuden RH , tuulen nopeuden WS ja kokonaisäteilyn G_{rad} arvoista. Ilman suhteellinen kosteus on ilmoitettu nestemäisen veden suhteen määritetyn vesihöyryn kyllästysosapaineen avulla, myös lämpötilan ollessa nollan alapuolella.

Ilmatieteen laitoksen säähavainnot ovat käyneet läpi päivittäiset laatu- ja virhetarkastukset. Testivuoden valintaa varten muodostettu säätietokanta tarkastettiin puuttuvien havaintojen varalta, ja mahdolliset aukot täydennettiin lähellä sijaitsevien sääasemien havaintojen avulla tai interpoloimalla puuttuva havainto edellisten ja seuraavien havaintojen avulla (liite 3).

Uuden testivuoden TRY2012 lopulliseen sääaineistoon (luku 6) sisältyy ilman lämpötilan, suhteellisen kosteuden, kokonaissäteilyn ja tuulen nopeuden lisäksi myös tuulen suunta sekä hajasäteily vaakapinnalle $RDIF$ ja suora säteily auringonsädettä vastaan kohtisuoralle pinnalle $RDIR$. $RDIF$ on laskettu mitatusta hajasäteilystä ja mitatusta kokonaissäteilystä käyttäen korjauskerrointa, joka ottaa huomioon hajasäteilyn mittauksessa käytetyn suoran säteilyn varjostusrenkaan vaikutuksen (liite 3). Suoran säteilyn arvo saadaan vaakapinnalle kokonaissäteilyn ja korjatun hajasäteilyn erotuksena, ja auringonsädettä vastaan kohtisuoralle pinnalle se määritetään liitteen 3 kaavojen avulla.

Auringon säteilyenergian määrät esitetään tässä raportissa yksiköissä MJ m^{-2} tai kJ m^{-2} , kun taas uudistumassa olevan Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D3 (RakMk D3, 2012) liitteessä 2 käytetään yksikköä kWh m^{-2} . Yksi kilowattitunti (kWh) vastaa 3,6 megajoulea (MJ). Energialaskennan testivuoden tunnittaisessa säähavaintoaineistossa esitetään auringonsäteilyn vuon keskiarvo edeltäneen tunnin aikana yksikössä W m^{-2} .

Säteilysuureista on saatavissa havaintoja tunneittain lähes koko jaksolta 1980–2008, mutta muiden suureiden havainnot on tehty kolmen tunnin välein. Koska lopullinen testivuosiaineisto koostuu säämuuttujien arvoista tunnein välein, siinä on mukana havaintohetkien väliin interpoloituja lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja tuulisuuden arvoja (luku 5.4).

Tunnittaisten sääaineistojen lisäksi uudelle testivuodelle määritettiin pystypinnoille ja 45 astetta kallistetuille pinnoille tulevan auringon kokonaissäteilyenergian kuukausittaiset arvot eri ilmansuuntiin (liitteet 3 ja 8).

5 Energialaskennan testivuoden 2012 muodostaminen

5.1 Vaihe 1: Standardin mukainen menetelmä

Nykyistä keskimääräistä ilmastoa mahdollisimman hyvin kuvaavan uuden testivuoden valinnan ensimmäinen vaihe noudattaa ISO-standardia (SFS EN ISO 15927-4, 2005). Sen mukaan säämuuttujien arvot tunneittain saadaan rakennusten vuotuisen energiantarpeen laskentaa varten testivuodesta, joka koostuu kutakin kalenterikuukautta edustavista, todellisuudessa esiintyneistä ns. tyyppikuukausista. Nämä kuukaudet voivat olla peräisin eri vuosilta, ja ne valitaan paikkakunnan pitkäaikaisista säätiedoista Finkelstein-Schaferin (Finkelstein & Schafer, 1971) tilastollisen valintakriteerin mukaisesti. Tarkasteltavana on neljä säämuuttujaa: ilman lämpötila, kosteus (vesihöyryn osapaine), auringon kokonaissäteily vaakapinnalle ja tuulen nopeus.

Jokaisen vuoden y jokaiselle kuukaudelle m ja säämuuttujalle p lasketaan vuorokautisten keskiarvojen \bar{p} summafrekvenssijakauma pysyvyysarvon $F_{p,y,m,i}$ määrittämiseksi (muuttujan saamat arvot jaetaan n luokkaan ja $i = 1, \dots, n$). Kaikkien yksittäisten vuosien kaikkien kuukausien pysyvyyskäyrien lisäksi lasketaan jokaiselle kahdelletoista kalenterikuukaudelle kunkin suureen vuorokausikeskiarvojen keskimääräinen (klimatologinen) pysyvyyskäyrä $\Phi_{p,m,i}$ koko pitkäaikaisen sääaineiston (vuodet 1980–2009) perusteella. Jokaiselle vuodelle y , kuukaudelle m ja ilmastomuuttujalle p lasketaan sitten ns. Finkelstein-Schaferin parametri:

$$FS_{(p,y,m)} = \sum_{i=1}^n |F_{(p,y,m,i)} - \Phi_{(p,m,i)}| \quad (5.1)$$

missä

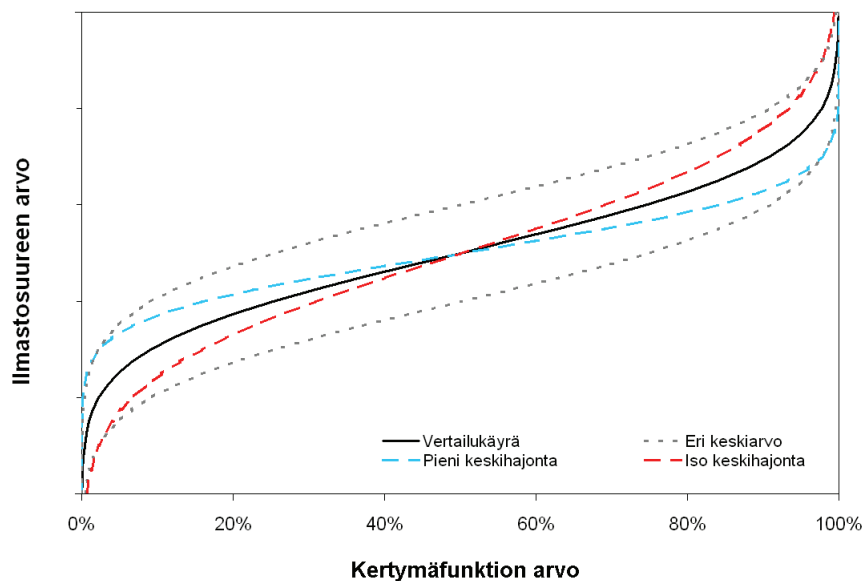
- $F_{(p,y,m,i)}$ ilmastomuuttujan p vuonna y ja kuukautena m tehdyistä havainnoista lasketun pysyvyyskäyrän arvo luokassa i ;
- $\Phi_{(p,m,i)}$ ilmastomuuttujan p pitkäaikaisen havaintoaineiston perusteella lasketun keskimääräisen pysyvyyskäyrän arvo kuukautena m luokassa i .

Seuraavaksi lasketaan yhteen Finkelstein-Schaferin parametrit ilman lämpötilalle (FS_T), kosteudelle vesihöyrypaine (FS_p) ja kokonaissäteilylle ($FS_{G\text{rad}}$) kyseisenä kuukautena m ja vuonna y :

$$\sum FS = FS_T + FS_p + FS_{G\text{rad}} \quad (5.2)$$

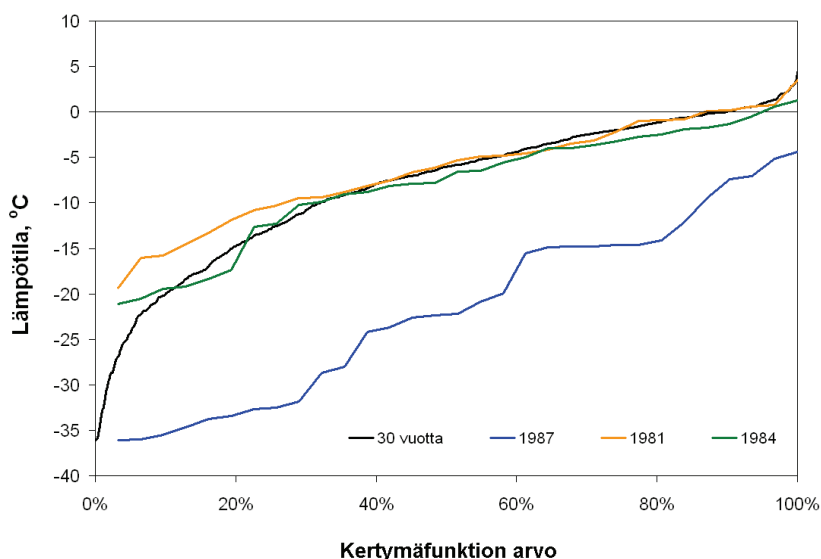
Testivuoden kuukausien valinta perustuu summaan $\sum FS$. Valinta tehdään erikseen jokaiselle 12 kalenterikuukaudelle 30 vuoden sääaineistosta hyödyntäen. Ne kolme eri vuosien kuukautta, joihin summa on ollut pienin, valitaan ehdokkaiksi. Näistä kolmesta se kuukausi, jolla tuulen Finkelstein-Schaferin parametri (FS_{WS}) on pienin, valitaan lopulta energialaskennan testivuoden kuukaudeksi.

Menetelmä vertaa keskenään yksittäisten kuukausien ja koko 30-vuotuisen sääaineiston tilastollisia ominaisuuksia tarkastellen useita säämuuttujia. Valintaa ei tehdä ainoastaan keskiarvojen perusteella, vaan huomioon otetaan koko frekvenssijakauma. Menetelmän periaate on esitetty kuvassa 5.1. Mitä lähempänä yksittäisen kuukauden säähavaintojen mukaiset jakaumat F ovat kalenterikuukauden keskimääräistä, pitkäaikaiseen sääaineistoon perustuvaa vertailukäyrää Φ , sitä pienempi on kyseisen säämuuttujan Finkelstein-Schaferin parametri FS .

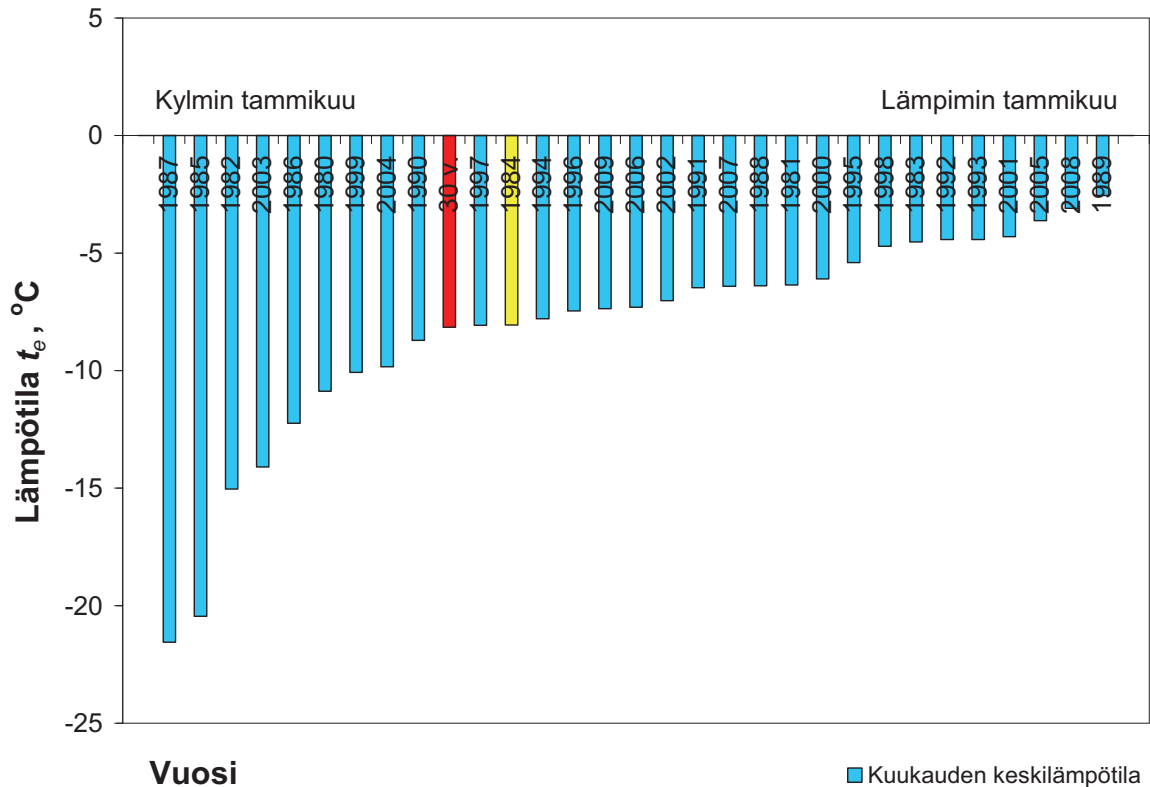


Kuva 5.1. Kaavamainen esitys ilmastomuuttujan vuorokautisten keskiarvojen tilastollisista jakauksista. Musta yhtenäinen vertailukäyrä: kalenterikuukauden keskimääräinen, pitkäaikaiseen havaintoaineistoon perustuva todennäköisyysjakauman kertymäfunktio (pysyvyyskäyrä). Punainen ja sininen katkoviiva: yksittäisten kuukausien säähavaintojen mukaisia jakaumia, joilla on keskimääräisen jakauman kanssa sama keskiarvo, mutta eri keskihajonta. Harmat pisteviivat: yksittäisten kuukausien jakaumia, joilla on sama keskihajonta mutta eri keskiarvo.

Esimerkkinä menetelmän soveltamisesta tarkastellaan vuorokauden keskilämpötilojen jakaumia tammikuussa Jyväskylässä (kuva 5.2). Kaikkien 30 vuoden tammikuiden havainnoista lasketusta klimatologisesta jakaumasta (musta vertailukäyrä) poikkeaa eniten vuoden 1987 tammikuun jakauma (sininen käyrä) ja vähiten vuoden 1981 tammikuun jakauma (oranssi käyrä). Vuoden 1984 tammikuussa (vihreä käyrä) ero keskimääräiseen jakaumaan on kuitenkin pienin kaikki säämuuttujat (lämpötila, säteily, kosteus, tuuli) huomioon ottaen. Tuon kuukauden keskilämpötilaa verrataan kuvassa 5.3 jakson 1980–2009 muiden tammikuiden keskilämpötiloihin.



Kuva 5.2. Vuorokauden keskilämpötilojen jakaumia Jyväskylässä tammikuussa. Musta käyrä esittää koko 30-vuotisjakson 1980–2009 havainnoista laskettuja kertymäfunktion arvoja, värilliset käyrät yksittäisiä vuosia (sininen: 1987, oranssi: 1981 ja vihreä: 1984).



Kuva 5.3 Tammikuun kuukausikeskilämpötilat Jyväskylässä vuosina 1980–2009 suuruusjärjestykseen asetettuina. Keltainen pylväs esittää testivuotteen valitun tammikuun 1984 keskilämpötilaa ja punainen pylväs 30-vuotisjakson kaikkien tammikuiden keskiarvoa.

Yhteenveto energialaskennan testikuukausien valinnan ensimmäisen vaiheen tuloksista SFS EN ISO 15927-4 –standardin mukaisella menetelmällä on esitetty liitteessä 4. Näitä välituloksina saatuja testikuukausia käytettiin testivuoden TRY2012 muodostamisen seuraavassa vaiheessa sen määrittämiseen, kuinka suuri painokerroin eri säämuuttujille tulisi antaa lopullisen testivuoden kuukausia valittaessa.

5.2 Vaihe 2: Säämuuttujien painokertoimet

Eri meteorologiset suureet vaikuttavat rakennusten lämmitys- ja jäähdytystarpeeseen eri tavoin riippuen vuodenajasta ja tarkasteltavan alueen ilmastosta. Suomessa rakennusten lämmitystarve riippuu eniten lämpötilasta, ja säteilyn merkitys korostuu puolestaan kesällä. Standardin mukainen menetelmä (SFS EN ISO 15927-4, 2005) ei ota tätä huomioon, vaan lämpötilalla, kosteudella ja säteilyllä on valinnassa yhtä suuri painoarvo. Tuulen merkitys on kuitenkin pienempi, sillä se vaikuttaa valintaan vain lopuksi, kun jäljellä on enää kolme ehdokaskuukautta. Koska tämän kansainvälisen standardin mukaisen menetelmän täytyy soveltua maapallon eri ilmastovyöhykkeisiin, on ymmärrettävää, ettei kansainvälisesti ole määritelty, millaisia painokertoimia eri ilmastomuuttujille tulisi testikuukausia valittaessa antaa. Sen sijaan käytäntö vaihtelee maasta toiseen, kuten nähdään taulukosta 5.1. Joissakin menetelmissä tarkastellaan sääsuureen vuorokausivaihteluakin (esim. TMY: vuorokauden maksimilämpötilan paino on 1/24, vuorokauden minimilämpötilan 1/24 ja vuorokauden keskilämpötilan 2/24). Taulukon 5.1 menetelmissä vuoden kaikille kuukausille on käytetty samoja painokertoimia.

Painokertoimia käytettäessä jokaisen meteorologisen suureen Finkelstein-Schaferin parametri kerrotaan kyseisen suureen painokertoimella ja parametrit lasketaan yhteen kyseisenä kuukautena m ja vuonna y :

$$\sum FS = w_T \cdot FS_T + w_p \cdot FS_p + w_{G\text{rad}} \cdot FS_{G\text{rad}} + w_{ws} \cdot FS_{ws} \quad (5.3)$$

missä

FS_T lämpötilan Finkelstein-Schaferin parametri,

FS_p kosteuden (vesihöyrypaine) Finkelstein-Schaferin parametri,

$FS_{G\text{rad}}$ kokonaissäteilyn Finkelstein-Schaferin parametri,

FS_{ws} tuulen nopeuden Finkelstein-Schaferin parametri,

$w_T, w_p, w_{G\text{rad}}, w_{ws}$ ilmastomuuttujan (lämpötila, kosteus, kokonaissäteily, tuuli) painokerroin.

Painokertoimien käytön etuna on se, että ilmastomuuttujan merkitys rakennusten energiantarpeen kannalta voidaan ottaa standardimenetelmään verrattuna paremmin huomioon. Koska ilmastomuuttujien vaikutus on erilainen eri rakennuksille ja rakennustyypeille, tarvittavien laskelmien määrä kuitenkin kasvaa.

Taulukko 5.1. Eri käytäntöjen mukaisia ilmastomuuttujille annettavia painokertoimia testivuotta valittaessa.

Testivuosi	Ilmastomuuttujan painokerroin			
	Lämpötila, w_t	Kosteus, w_p	Säteily, $w_{G\text{rad}}$	Tuuli, w_{ws}
SFS EN ISO 15927-4	33% (1/3)	33% (1/3)	33% (1/3)	Otetaan huomioon valinnan 2. vaiheessa
TMY (NCC, 1981)	17% (4/24)	17% (4/24)	50% (12/24)	17% (4/24)
TMY-2 (Marion ja Urban, 1995)	20% (4/20)	20% (4/20)	50% (10/20)	10% (2/20)
Slovenia (Vertačnik, 2008)	50%	-	50%	-
Belgia (Dogniaux ja Sneyers, 1977)	50%	-	50%	-
Iso-Britannia (Levermore ja Parkinson, 2006)	33% (1/3)	-	33% (1/3)	33% (1/3)
Kanada (WSL, 1992)	40%	10%	40%	10%
Malesia (Rahman ja Dewsbury, 2007)	25% (1/4)	25% (1/4)	25% (1/4)	25% (1/4)
testaus eri painokertoimien vaikutuksesta; lopullisessa valinnassa käytettiin painokerrointa 1/4)	40% (2/5)	20% (1/5)	20% (1/5)	20% (1/5)
	20% (1/5)	40% (2/5)	20% (1/5)	20% (1/5)
	20% (1/5)	20% (1/5)	40% (2/5)	20% (1/5)
	20% (1/5)	20% (1/5)	20% (1/5)	40% (2/5)
	33% (1/3)	33% (1/3)	33% (1/3)	-

5.2.1 Painokertoimien määrittäminen esimerkkirakennusten avulla

Tässä tutkimuksessa ilmastomuuttujille asetettavat painokertoimet määritettiin käyttäen esimerkkirakennusten energialaskelmia. Vertailtavana oli se, miten paljon eri meteorologisten suureiden muuttaminen yksi kerrallaan vaikuttaa rakennusten lämmitys- ja jäähdytysenergian nettotarpeeseen. Mitä enemmän vaikutusta, sitä suuremman painoarvon ilmastomuuttujan tulee saada energialaskennan testikuukausien valinnassa.

Laskentaohjelma

Esimerkkirakennuksiksi valittiin pientalo (kuva 5.4) ja toimistotalo (kuva 5.5). Niiden energiantarvetta analysointiin dynaamisella IDA Indoor Climate and Energy (ICE) –simulointiohjelmalla (versio 4.0), joka soveltuu rakennusten energiankulutuksen, lämpöolojen sekä sisäilman laadun laskentaan. Ohjelmalla voidaan simuloida LVI-tekniisiä järjestelmiä ja rakennuksen sisäisiä lämpökuormia sekä auringon lämpökuormia ja ilmaston vaikutuksia. IDA-ICE 4.0 valittiin laskentaohjelmaksi, koska sen avulla voidaan ottaa huomioon seuraavia ilmastomuuttujien painokertoimien määrittämiseen liittyviä asioita:

- Samanaikaisesti rakennuksen useiden tilojen lämpötaseet, jolloin otetaan huomioon auringon säteily, ihmisten aiheuttama kuormitus (lämpö, kosteus, hiilidioksidi), laitteet ja valaistus, ilmanvaihto, vuotoilmanvaihto, lämmitys- ja jäähdytyslaitteet, kylmäsillat ja huoneen sisäinen terminen massa (esim. kalusteet);
- Ikkunoiden läpäisemä auringonsäteily, jonka laskennassa otetaan huomioon viereisten rakennusten, laskettavan rakennuksen ja erilaisten markiisien ja lippojen aiheuttamat varjostukset;
- Sisäilman ja rakennuksen pintojen lämpötilat;
- Pitkäaaltainen säteily Stefan-Boltzmannin lain mukaisesti ja pintojen väliset näkyvyyskertoimet numeerisesti laskettuina;
- Konvektiiviset lämmönsiirtokertoimet lämpötilaerojen ja pinnan suuntauksen funktiona;
- Tuulesta ja lämpötilaeroista johtuvat rakennuksen vuotoilmavirtaukset. Tämä mahdollistaa ikkunatuuletuksen, painovoimaisten ilmanvaihdon sekä oviaukkojen osuuksien laskennan;
- Ilmanvaihdon ilmamäärät sekä ilman lämpötila, kosteussisältö, CO₂-pitoisuus ja paine;
- Eri ajanhetkinä tarvittavat lämmitys- ja jäähdytystehot huoneissa ja koko rakennuksessa.

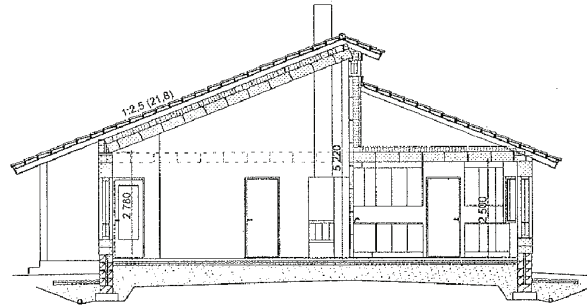
Esimerkkirakennukset

Pientalo

Laskelmat suoritettiin yksikerroksiselle pientalolle (kuva 5.4).



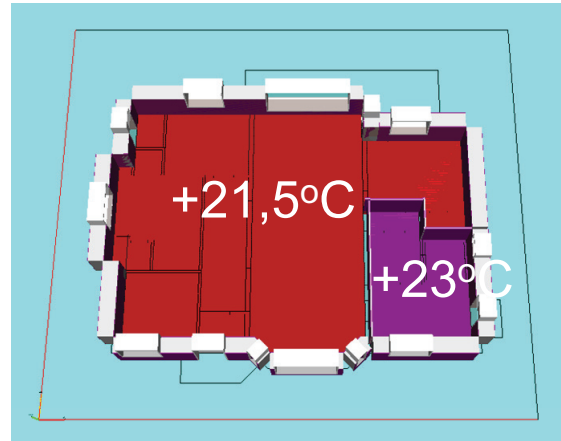
Katunäkymä



Leikkaus



Pohjapiirros



Laskentavyöhykkeet

Kuva 5.4. Esimerkkinä tarkasteltu yksikerroksinen pientalo.

Pientalossa oli käytössä suora sähkölämmitys, ja lämmönjako oli toteutettu sähköllä toimivilla lämpöpattereilla. Rakenteiden lämmöneristystaso on heikoin, mitä rakentamismääräykset (RakMk C3, 2010) sallivat (ns. normitalo 2010). Tämän mukaiset rakennusvaipan ominaisuudet on annettu taulukossa 5.2.

Taulukko 5.2. Esimerkkinä tarkastellun pientalon rakennusvaipan ominaisuudet (Normitalo 2010).

Rakennusvaipan lämmönläpäisykerroin U , $W/(m^2K)$	
Ulkoseinä	0,17
Yläpohja	0,09
Maanvarainen alapohja	0,16
Ulko-ovet	1,0
Ikkuna	1,0
Lasin varjostuskertoimet*:	
aurionsäteilyn kokonaisläpäisykerroin g	0,56
suoraan ikkunan läpäisemä lyhytaaltainen säteily	0,44
Ilmavuotoluku n_{50} (1/h)	2

* Ikkunoiden sisäpuoliset sälekaihtimet vähentävät auringon kokonaissäteilyn läpäisyä 35% ja valon läpäisyä 84%.

Laskennassa oletettiin talossa käytettävän ilmanvaihtokonetta, jonka tuloilman lämpötilasuhde oli 0,55. Keskeiset ilmanvaihtojärjestelmän tiedot on esitetty taulukossa 5.3. Kaikissa laskelmissa oli mukana koneellinen jäähdytys. Tilojen jäähdytyksen asetusarvo oli 25 °C, ja jäähdytykseen käytetyn ilmalämpöpumpun keskimääräinen vuotuinen kylmäkerroin oli 4,0.

Taulukko 5.3. Pientalon ilmanvaihtojärjestelmän ominaisuuksia.

Ilmanvaihtokerroin, 1/h	0,5
Tulo- ja poistoilmavirtojen suhde	0,95
LTO:n tuloilman lämpötilasuhde, %	55
LTO:n jäätyksen eston rajoituslämpötila poistoilmalle, °C	5
Ominais sähköteho SFP, kW/(m ³ s)	2,3

Lämpimän käyttöveden kulutus oli kaikissa lasketuissa esimerkeissä 50 dm³/henkilö vuorokaudessa (RakMK D5, 2007) ja asukkaiden lukumäärä oli neljä (33 m²/hlö). Laskennassa käytetyt sisäiset lämpökuormat olivat:

Ihmiset: 37 kWh/(m² a)

Kotitaloussähkö: 25 kWh/(m² a)

Valaistus: 7 kWh/(m² a).

Taulukossa 5.4 on esitetty pientalon ostoennergiankulutus simuloituna Vantaan, Jyväskylän ja Sodankylän säätiedoilla käyttäen luvussa 5.1 esitetyn standardin SFS EN ISO 15927-4 mukaisesti valittuja testikuukausia (liite 4). Esimerkkitalon ostoennergiankulutus sisältää rakennuksen tilojen, ilmanvaihdon sekä käyttöveden lämmityksen sähkönkulutuksen sekä tilojen jäähdytyksen, valaistuksen ja laitteiden (huoneissa olevat laitteet sekä puhaltimet ja pumput) sähkönkulutuksen.

Taulukko 5.4. Yksikerroksisen esimerkkitalon (huoneistoala 133 m²) ostoennergiankulutus huoneistoalaan suhteutettuna, yksikkö kWh/(m²·a). Käytetty sääaineisto on testivuoden ensimmäisen valintavaiheen mukainen (liite 4), ja se poikkeaa hieman lopullisesta TRY2012-aineistosta.

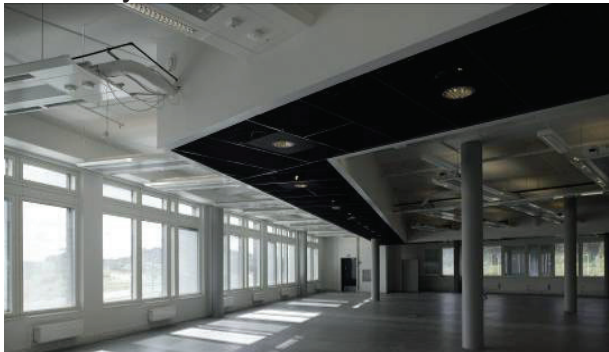
Ostoennergiankulutus	Vantaa	Jyväskylä	Sodankylä
Tilojen lämmitys	57	69	84
Tilojen jäähdytys sähkö	3	2	1
Ilmanvaihdon lämmitys	11	14	20
Puhaltimet	7	7	7
Kotitaloussähkö	25	25	25
Valaistus	7	7	7
Lämmin käyttövesi	36	36	36
Ostoennergia yht.	146	160	180

Toimistorakennus

Laskelmat suoritettiin viisikerroksiselle (kellari ja neljä maanpäällistä kerrosta) toimistorakennukselle (kuva 5.5). Rakennuksen nettoala on 6245 m², julkisivun pinta-ala 3490 m² ja ikkunoiden pinta-ala yhteensä 1194 m² (35 % julkisivun alasta ja 19 % huoneistoalasta).



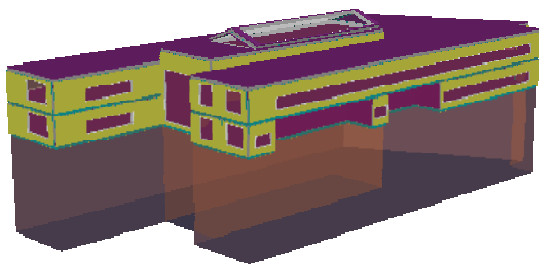
Katunäkymä



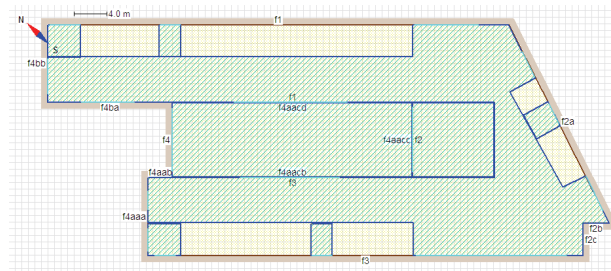
Sisänäkymä



Sisänäkymä



Laskentavyöhykkeet



Laskentavyöhykkeet (3. krs)

Kuva 5.5. Simuloitu viisikerroksinen toimistorakennus.

Toimistorakennuksessa oli käytössä kaukolämmitys, ja lämmönjako oli toteutettu vesikiertoisilla lämpöpattereilla. Rakenteiden lämmöneristys edusti rakentamismääräysten (RakMk C3, 2010) minimitasoa (taulukko 5.5).

Laskennassa käytettiin ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton tuloilman lämpötilasuhtena arvoa 0,55. Keskeiset ilmanvaihtojärjestelmän tiedot on esitetty taulukossa 5.5. Kaikissa laskentaesimerkeissä käytettiin koneellista jäähdytystä. Tilojen jäähdytyksen asetusarvo oli 25 °C, ja jäähdytysjärjestelmän vuoden keskimääräinen kylmäkerroin oli 4,0.

Taulukko 5.5. Esimerkkinä tarkastellun toimistorakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän ominaisuuksia.

Yleisilmanvaihto	2,0 l/(s·m ²)
Ilmanvaihto neuvotteluhuoneissa	0,5-4,0 l/(s·m ²)
Tulo-poisto ilmavirtojen suhde	0,95
Lämmöntalteenoton (LTO) tuloilman lämpötilasuhde, %	55
Ilmanvaihdon käyntiaika:	ma-pe klo 6–18
LTO:n jäätymineneston rajoituslämpötila poistoilmalle, °C	5
Ominais sähköteho SFP, kW/(m ³ s)	2,3

Laskennassa käytetyt sisäiset lämpökuormat olivat:

Ihmiset: 14 kWh/(m² a)

Laitteet: 24 kWh/(m² a)

Valaistus: 29 kWh/(m² a).

Taulukossa 5.6 on esitetty toimistorakennuksen ostoenergiankulutus simuloituna Vantaan, Jyväskylän ja Sodankylän säätiedoilla käyttäen liitteessä 4 esitettyjä standardin SFS EN ISO 15927-4 (2005) mukaisesti valittuja testikuukausia. Esimerkkitalon ostoenergiankulutus sisältää rakennuksen tilojen, ilmanvaihdon sekä lämpimän käyttöveden kaukolämmönkulutuksen sekä tilojen ja ilmanvaihdon jäähdytyksen, valaistuksen ja laitteiden (huonelaitteet sekä puhaltimet ja pumput) sähkökulutuksen.

Taulukko 5.6. Viisikerroksisen toimistorakennuksen (nettoala 6245 m²) ostoenergiankulutus nettoalaan suhteutettuna, yksikkö kWh/(m²·a). Käytetty sääaineisto on testivuoden ensimmäisen valintavaiheen mukainen (liite 4), ja se poikkeaa hieman lopullisesta TRY2012-aineistosta.

Ostoenergiankulutus	Vantaa	Jyväskylä	Sodankylä
Tilojen lämmitys	28	35	49
Tilojen ja ilmanvaihdon jäähdytys sähkö	7	4	3
Ilmanvaihdon lämmitys	27	35	49
Puhaltimet	15	15	15
Laitesähkö	24	24	24
Valaistus	29	29	29
Lämmin käyttövesi	14	14	14
Ostoenergia yht.	144	156	183

Ilmastomuuttujien vaikutus

Eri ilmastomuuttujien vaikutusta esimerkkirakennusten energiantarpeeseen arvioitiin herkkyystarkastelujen avulla. Kutakin meteorologista suuretta kerrallaan muutettiin hieman siten, että eri suureiden muutokset ovat keskenään vertailukelpoisia. Tässä tutkimuksessa on käytetty menetelmää, jossa meteorologisen suureen muutoksen ja sen havaintojen mukaisen keskihajonnan suhde on yhtä suuri kaikille suureille. Kuukauden keskilämpötiloja korotettiin tai laskettiin kahden asteen verran, minkä suuruisen jakauman siirron suhde keskihajontaan on

$$x = \frac{\Delta T}{\sigma_T} \quad (5.4)$$

missä

ΔT kuukauden keskilämpötilan poikkeutus; 2°C;

σ_T kuukauden keskilämpötilan keskihajonta, °C.

Tätä samaa kerrointa käytettiin poikkeutettaessa kokonaissäteilyn (kuvien 5.6–5.7 oikea puoli), kosteuden ja tuulen nopeuden arvoja:

$$\Delta G_{\text{grad}} = x \cdot \sigma_{G_{\text{grad}}} \quad (5.5)$$

$$\Delta p = x \cdot \sigma_p \quad (5.6)$$

$$\Delta w_s = x \cdot \sigma_{w_s} \quad (5.7)$$

missä

ΔG_{grad} kuukauden keskimääräinen kokonaissäteilyn poikkeutus, W/m²;

$\sigma_{G_{\text{grad}}}$ kokonaissäteilyn keskihajonta, W/m²;

Δp kuukauden keskimääräinen vesihöyrypaineen poikkeutus, Pa;

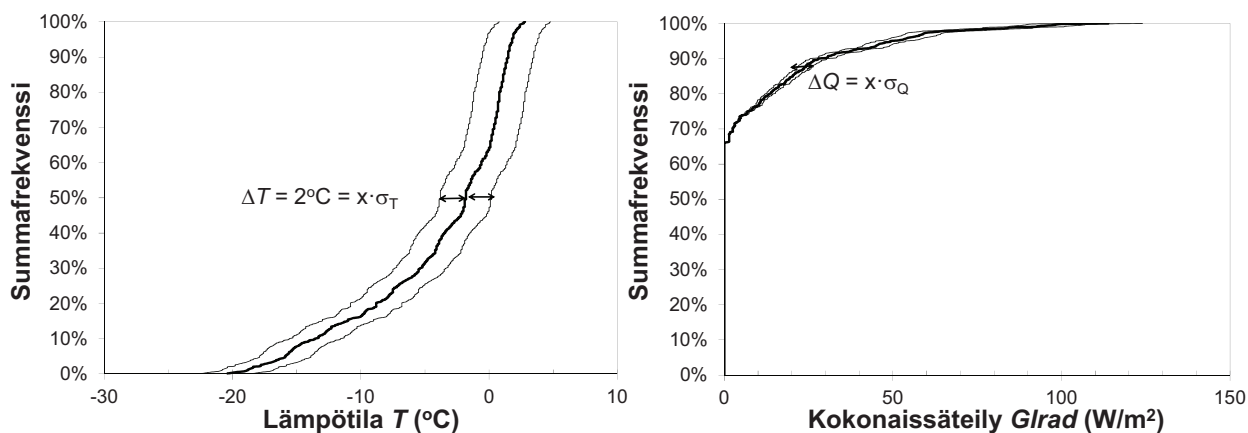
σ_p vesihöyrypaineen keskihajonta, Pa;

Δw_s kuukauden keskimääräinen tuulen nopeuden poikkeutus, m/s;

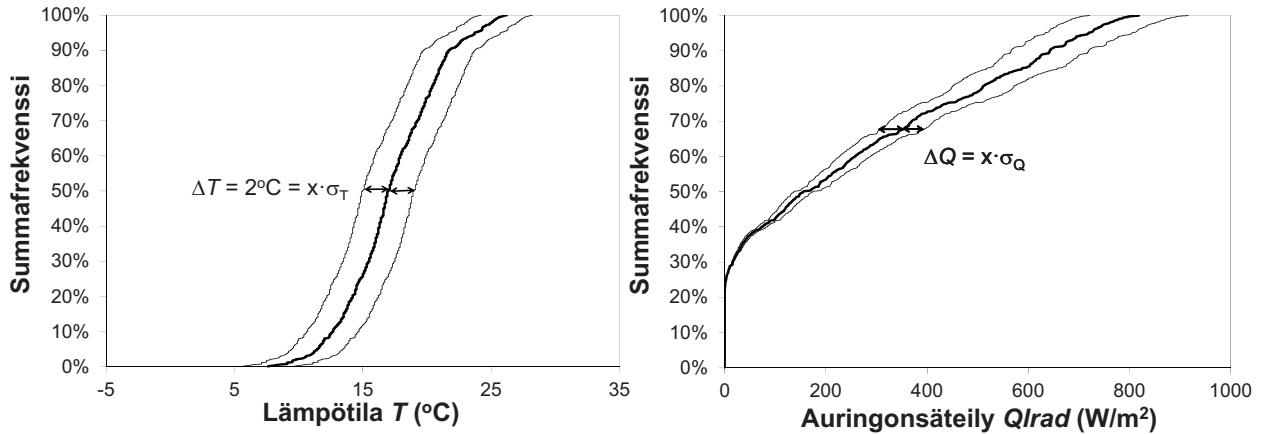
σ_{w_s} tuulen nopeuden keskihajonta, m/s

kyseisenä kuukautena.

Näiden poikkeutusten vaikutuksia tunnitaiten lämpötila- ja säteilyarvojen jakaumiin testivuoden tammi- ja heinäkuussa on havainnollistettu kuvissa 5.6–5.7.



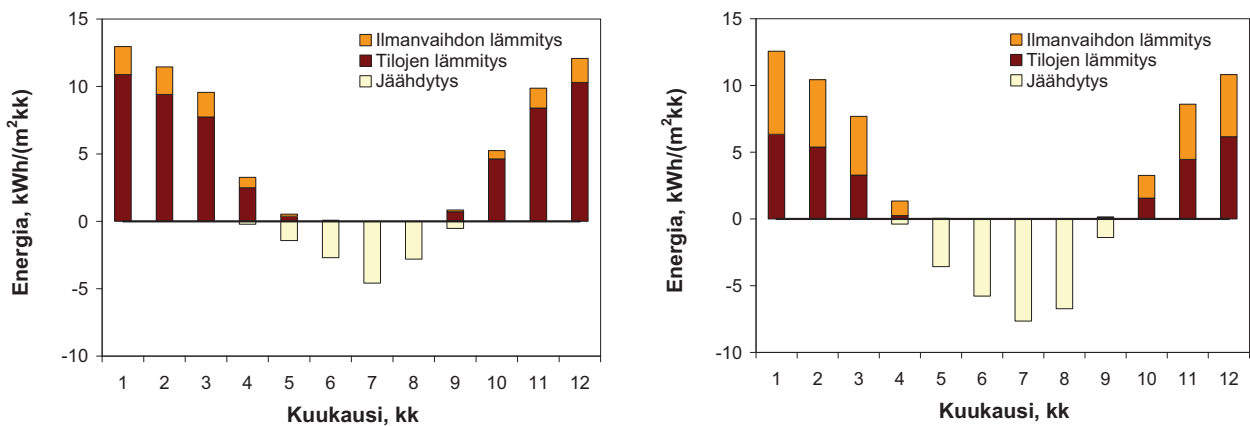
Kuva 5.6. Lämpötilan (vasen) ja kokonaissäteilyn (oikea) poikkeutuksen vaikutus kyseisen säämuuttujan tunnitaiten arvojen summafrequenssijakaumaan Jyväskylässä testivuoden tammikuussa.



Kuva 5.7. Lämpötilan (vasen) ja kokonaissäteilyn (oikea) poikkeutuksen vaikutus kyseisen säämuuttujan tunnitteisten arvojen summafrekvenssijakaumaan Jyväskylässä testivuoden heinäkuussa. Huomaa, että vaaka-akselien asteikot eivät ole samat kuin kuvassa 5.6.

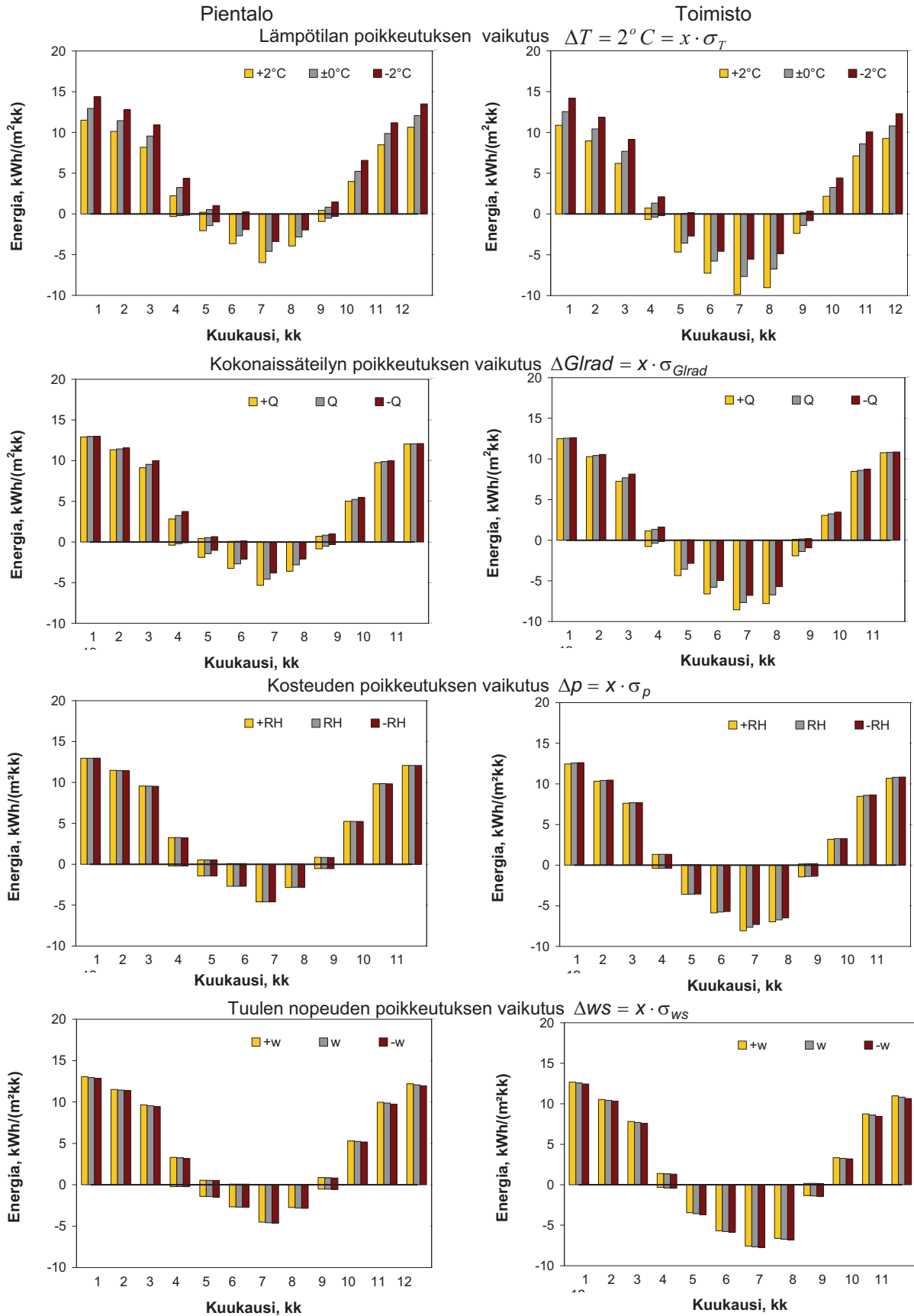
5.2.2 Eri ilmastomuuttujien vaikutus rakennusten energiantarpeeseen

Eri sääsuureiden vaikutusta rakennuksen energiantarpeeseen tutkittiin laskemalla aluksi esimerkkirakennusten lämmitys- (tilojen lämmitys + ilmanvaihdon lämmitys) ja jäähdytysenergian nettotarpeet kuukausittain, kun säätietoina käytettiin luvussa 5.1 esitetyn standardin mukaisesti valittujen testikuukausien havaintoja (liite 4). Tulokset Vantaalla (vyöhykkeet I–II) sijaitsevalle pientalolle ja toimistolle on esitetty kuvassa 5.8.



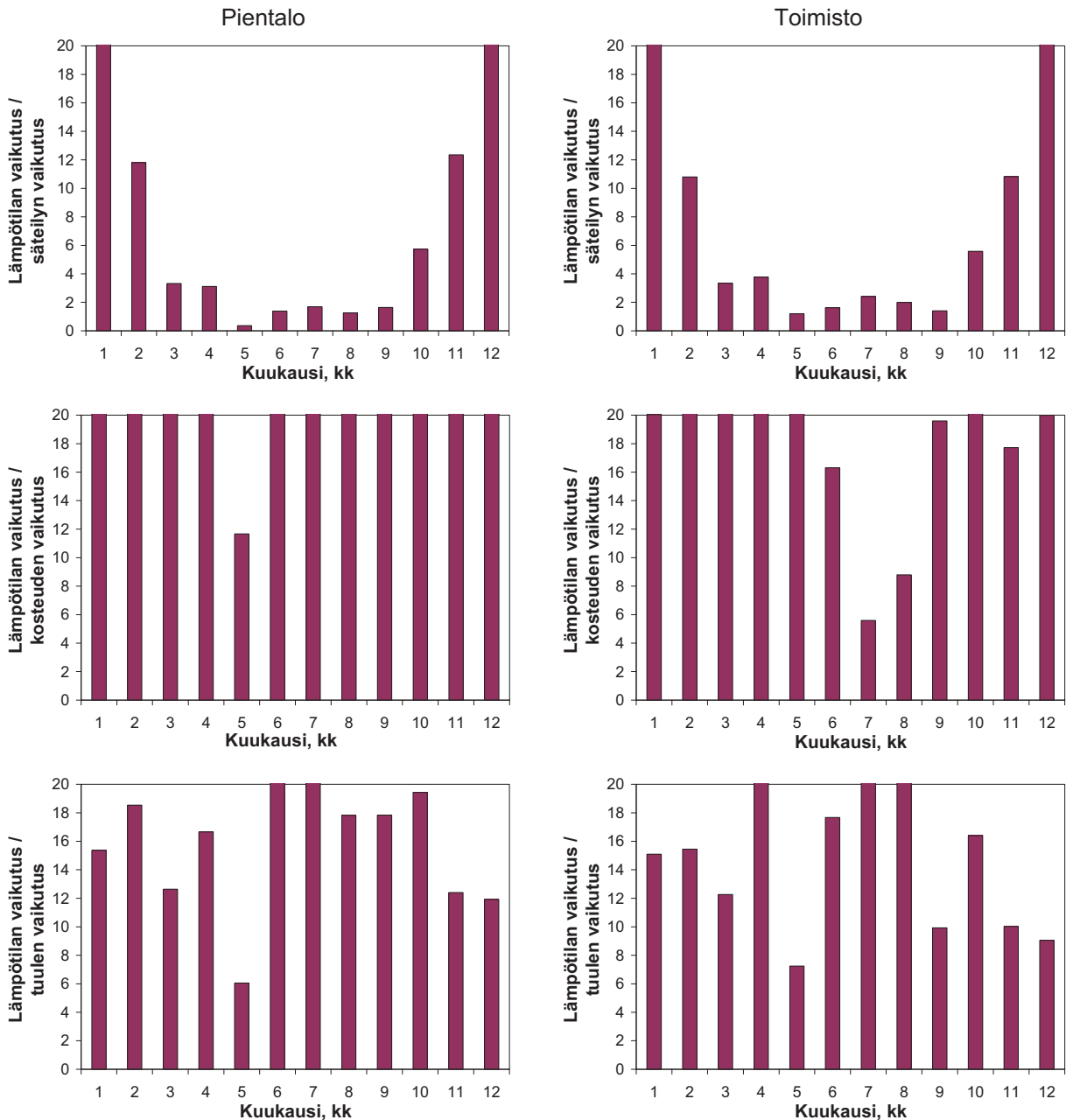
Kuva 5.8. Vantaalla sijaitsevan pientalon (vasen) ja toimiston (oikea) lämmitys- (posit.) ja jäähdytysenergian nettotarve (negat.) eri kuukausina, kun sääsuureiden arvoja ei ole poikkeutettu, vaan ne ovat havaintojen mukaisia.

Tämän jälkeen tarkasteltiin esimerkkirakennuksien energiantarpeen herkkyyttä eri sääsuureille muuttamalla erikseen kutakin suuretta, toistamalla energialaskelmat ja vertailemalla tuloksia. Ulkoilman lämpötilaa poikkeutettiin $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja 30 vuoden kuukausien keskiarvojen keskihajonnan suhteessa vastaavasti auringonsäteilyä, kosteutta sekä tuulen nopeutta (kaavat 5.4–5.7). Vaikutukset vantaalaisten esimerkkirakennusten lämmitys- ja jäähdytysenergian nettotarpeeseen nähdään kuvasta 5.9. Lämpötilan poikkeutuksen vaikutus on selvästi suurin.



Kuva 5.9. Eri säämuuttujien poikkeuttamisen vaikutus Vantaalla sijaitsevan pientalon (vasen) ja toimiston (oikea) lämmitys- (posit.) ja jäähdytysenergioiden nettotarpeeseen (negat.). Keltaiset/ruuskeat pylväät esittävät laskelmaa, jossa säämuuttujan arvoa on kasvatettu/pienennetty.

Ilman lämpötilan muuttamisen vaikutusten suhde muiden meteorologisten suureiden poikkeuttamisen vaikutuksiin (kuva 5.10) ilmaisee, kuinka suuri suhteellinen merkitys eri säämuuttujilla on rakennuksen lämmitys- ja jäähdytystarpeen kannalta. Mitä korkeampia kuvan 5.10 pylväät ovat, sitä suurempi on lämpötilan vaikutus verrattuna säteilyyn, tuulen nopeuteen tai ilman kosteuteen. Jos esimerkiksi ulkolämpötilan ja säteilyn vaikutuksen suhde on yksi (kesäkuukaudet), molemmat sääsuureet vaikuttavat rakennuksen lämmitys- ja jäähdytystarpeeseen yhtä paljon.



Kuva 5.10. Ulkoilman lämpötilan poikkeuttamisen vaikutus kuukausittaisiin lämmitys- ja jäähdytystarpeeseen Vantaalla sijaitsevassa pientalossa (vasen) ja toimistossa (oikea) suhteessa vaikutuksiin, jotka aiheutuvat auringon kokonaissäteilyn (ylärivi), ilman kosteuden (keskimmäinen rivi) ja tuulen nopeuden (alarivi) muuttamisesta. Suhdeluvun ollessa suurempi kuin 20 pylväät on katkaistu.

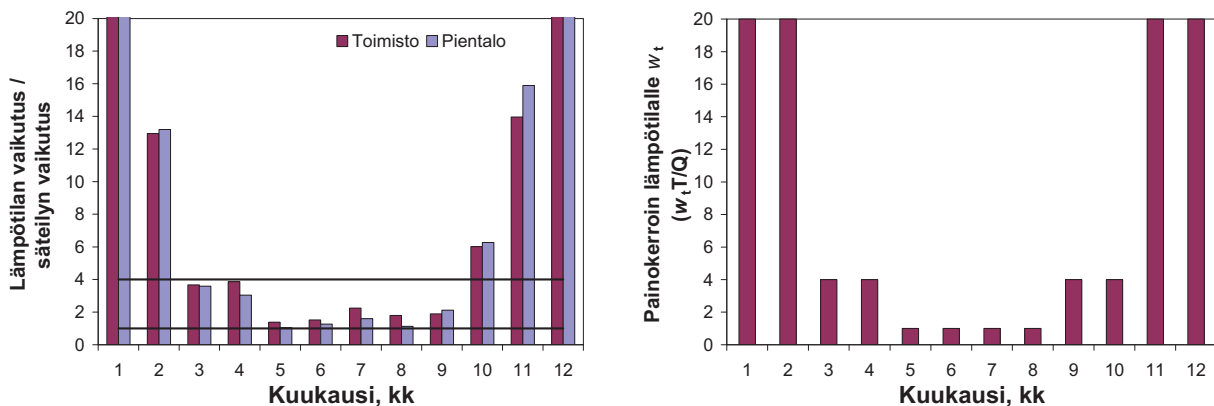
Vastaavat tulokset Jyväskylässä ja Sodankylässä (vyöhykkeet III ja IV) sijaitsevien pientalojen ja toimistojen lämmitys- ja jäähdytystarpeille on esitetty liitteessä 5.

Vantaalla, Jyväskylässä ja Sodankylässä sijaitsevien esimerkkirakennuksen tulokset olivat samansuuntaiset, kun tutkittiin rakennuksen lämmitys- ja jäähdytystarpeen herkkyyttä eri säämuuttujille. Vaikka ilmastollisista vyöhykkeistä ja rakennustyypeistä riippuen esiintyikin pieniä eroja, voidaan yhteenvetona todeta:

- tutkituista säämuuttujista kaikkein eniten rakennusten lämmitys- ja jäähdytystarpeeseen vaikuttaa lämpötila;
- kesällä auringon säteilyn vaikutus on suunnilleen yhtä suuri kuin lämpötilan;
- ilman kosteuden ja tuulen nopeuden vaikutukset ovat pieniä;
- tuulen nopeus vaikuttaa rakennusten lämmitys- ja jäähdytystarpeeseen kuitenkin enemmän kuin ulkoilman kosteus.

Kun otetaan huomioon sekä rakennuskannan jakautuminen lämpötilavyöhykkeiden välillä (kerrosalan perusteella; taulukko 2.1) että eri vyöhykkeille saadut tulokset, voidaan lämpötilan ja säteilyn merkityksen välinen suhde lämmitys- ja jäähdytystarpeeseen eri kuukausina esittää kuvan 5.11 (vasen) mukaisesti. Jos koko vuosi jaetaan kolmeen osaan ja käytetään kaavassa (5.3) auringon säteilyn painokertoimelle arvoa $w_{G_{rad}}=1$, saadaan lämpötilan painokertoimelle seuraavat keskiarvot (kuva 5.11, oikea):

- talvi/lämmityskausi: $w_T = 20$;
- kesä/jäähdytyskausi: $w_T = 1$;
- välikausi: $w_T = 4$.



Kuva 5.11. Laskelmien mukainen (vasen) ja yksinkertaistettu (oikea) lämpötilan ja säteilyn merkityksen välinen suhde eri kuukausina sen kannalta, miten ne vaikuttavat lämmitys- ja jäähdytystarpeeseen.

Saatujen tulosten nojalla päätettiin asettaa ilmastomuuttujien painokertoimet seuraavasti:

- vuosi jaetaan kolmeen osaan: talvi/lämmityskausi, kesä/jäähdytyskausi ja välikausi;
- kesällä lämpötilan ja säteilyn vaikutus energiantarpeeseen on yhtä suuri, mutta välikaudella ja lämmityskaudella lämpötilan painoarvo kasvaa kuvan 5.11 (oikea) mukaisesti;
- koska kosteudella ja tuulella on lämpötilaa ja säteilyä selvästi pienempi vaikutus, niitä ei oteta huomioon energialaskennan testivuoden ensimmäisellä valintakierroksella.

5.3 Vaihe 3: Muokattu standardi, menetelmä ja tulokset

Pientalon ja toimiston energialaskelmien avulla selvitettyjä painokertoimia käyttäen voidaan energialaskennan testivuotta valittaessa ottaa huomioon eri ilmastomuuttujien vaikutus energiankulutukseen tarkemmin kuin luvussa 5.1 esitetyllä SFS EN ISO 15927-4 -standardin mukaisella menetelmällä. Koska lämpötilan ja säteilyn merkitys osoittautui suuremmaksi kuin tuulen ja ilman kosteuden, standardimenetelmää muokattiin seuraavasti:

- Ensimmäisellä valintakierroksella käytetään vain lämpötilaa ja kokonaissäteilyä, vaikka standardin mukaisessa menetelmässä oli mukana myös kosteus (kaava 5.2).
- Vuosi jaetaan kolmeen osaan (talvi, välikausi, kesä).
- Lämpötilan Finkelstein-Schaferin parametriä FS_T painotetaan vuodenajasta riippuvalla kertoimella w_T , ja näin saatavan summan ΣFS pienimpien arvojen avulla valitaan kolme ehdokaskuukautta.
- Se kuukausi kolmesta ehdokkaasta, jolla tuulen ja kosteuden Finkelstein-Schaferin parametri on pienin, valitaan lopulta energialaskennan testivuoden kuukaudeksi.

Muokatussa energialaskennan testivuoden valintamenetelmässä tarkasteltava Finkelstein-Schaferin parametrien summa on siis

$$\sum FS = w_T \cdot FS_T + FS_{Grad} \quad (5.8)$$

missä

w_T lämpötilan painokerroin; minkä verran enemmän otetaan huomioon lämpötila kuin auringon kokonaissäteily (kuva 5.11, oikeanpuoleinen kaavio);

FS_T lämpötilan Finkelstein-Schaferin parametri (kuukaudelle m ja vuodelle y);

FS_{Grad} kokonaissäteilyn Finkelstein-Schaferin parametri (kuukaudelle m ja vuodelle y).

Lämpötilavyöhykkeiden I–IV energialaskennan testikuukausien lopullinen valinta, kun säämuuttujien erilainen vaikutus rakennusten lämmitys- ja jäähdytystarpeeseen on otettu huomioon, on esitetty taulukoissa 5.7–5.9. Nähtävinä ovat ne viisi kuukautta, joiden aikana lämpötilan (taulukon yläosa) ja kokonaissäteilyn (keskiosa) jakauma erosi vähiten pitkäaikaisesta, keskimääräisestä jakaumasta. Lihavoidulla kirjasimella on esitetty ne kolme kuukautta, joille lämpötilan ja säteilyn Finkelstein-Schaferin parametrien painotettu summa oli pienin (kaava 5.8). Näistä kolmesta valittiin energialaskennan testivuoteen se kuukausi (esitetty harmaalla varjostuksella), jolle tuulen nopeuden ja kosteuden keskimääräinen ero pitkäaikaiseen sääaineistoon oli pienin (alaosa).

Taulukko 5.7. Energialaskennan vyöhykkeiden I–II uuden testivuoden TRY2012 kuukaudet (harmaa tausta) valittuina Vantaan havaintoaineiston perusteella säämuuttujien painotusta käyttäen. Valinnan loppusuoralle päässeet muut kuukaudet on myös näytetty (katso teksti).

Järjestys	Vuosi											
	Tammi- kuu	Helmi- kuu	Maalis- kuu	Huhti- kuu	Touko- kuu	Kesä- kuu	Heinä- kuu	Elo- kuu	Syys- kuu	Loka- kuu	Marras- kuu	Joulu- kuu
Lämpötilan perusteella valitut kuukaudet												
1.	1981	2004	2004	2009	2005	1990	1983	2003	1997	1981	1984	1998
2.	1984	1998	1999	1991	1998	2000	1991	1990	1980	2007	1989	1999
3.	1990	2005	2000	2006	2006	2001	1989	1995	1988	1991	2006	1983
4.	2002	1988	1994	1980	2008	1998	1982	2004	1995	2004	2004	1984
5.	2006	1982	2008	1995	2004	2005	1992	1994	1981	1999	1997	1980
Säteilyn perusteella valitut kuukaudet												
1.	1995	2009	1994	1982	2006	2000	1986	2003	1989	1989	2008	2005
2.	1989	2005	1990	1998	1990	1983	1991	2009	1991	1995	1993	1998
3.	2004	1982	2004	2005	1989	2005	2002	2004	1982	1987	1999	2006
4.	1980	2004	2007	2007	1985	1995	2008	1999	2001	1992	2007	1983
5.	2000	2006	1999	2000	2000	1990	1989	1990	1996	1999	1989	2009
Lämpötilan, säteilyn, kosteuden ja tuulen perusteella valitut kuukaudet												
1.	1981	2004	2004	2009	2006	2000	1991	2003	1997	2007	1984	1998
2.	1984	1998	1999	2006	1998	1990	1989	2004	1995	1981	1989	1999
3.	1990	2005	1994	1991	2005	2005	2008	1990	1988	1991	2006	1983
4.	2002	1982	2000	1980	2007	2001	1983	2009	1980	2004	2004	1984
5.	2006	2001	2008	1995	2000	1984	1986	1991	1983	1999	1997	1980

Taulukko 5.8. Energialaskennan vyöhykkeen III uuden testivuoden TRY2012 kuukaudet (harmaa tausta) valittuina Jyväskylän havaintoaineiston perusteella säämuuttujan painotusta käyttäen. Lisäksi on näytetty valinnan loppusuoralle päässeet muut kuukaudet (katso teksti).

Järjestys	Vuosi											
	Tammi- kuu	Helmi- kuu	Maalis- kuu	Huhti- kuu	Touko- kuu	Kesä- kuu	Heinä- kuu	Elo- kuu	Syys- kuu	Loka- kuu	Marras- kuu	Joulu- kuu
Lämpötilan perusteella tehty valikoima												
1.	1981	1982	2008	2006	2008	2001	1982	1990	1997	1981	1984	1983
2.	1988	1997	1999	1991	2004	2007	1981	1995	1980	1988	2007	1984
3.	1984	2004	1991	2002	2000	2000	1980	1994	1981	1983	1989	1998
4.	2000	2005	1983	1996	1988	1985	1999	1982	1985	2006	2006	1980
5.	1991	1988	2000	2004	2006	1990	2006	2009	1988	1991	2004	1993
Säteilyn perusteella tehty valikoima												
1.	1995	1987	2004	2003	1999	1985	1989	1980	1998	2008	2002	1998
2.	1993	1992	2003	1996	2000	2009	1999	1990	2006	1989	2008	1992
3.	1989	2001	1985	1995	1989	1995	1995	1999	2008	1995	1993	1980
4.	2006	2004	2002	1986	1980	1988	2008	1985	1989	1983	2004	1996
5.	1994	1997	1997	1988	2006	1983	1987	2003	1993	1997	1992	1981
Lämpötilan, säteilyn, kosteuden ja tuulen perusteella tehty valikoima												
1.	1981	1982	1999	2006	2000	1985	1999	1990	1997	1983	1984	1983
2.	1984	1997	2008	1996	2008	2009	1989	1980	1980	1981	2007	1984
3.	1988	2004	1997	1991	2006	2001	2009	1995	1985	1998	1989	1998
4.	2000	2005	1983	2002	2005	1983	1981	1994	1988	2004	2006	1980
5.	1991	1988	2000	2007	1992	1990	1983	1982	1981	1990	2004	1993

Taulukko 5.9. Energialaskennan vyöhykkeen IV uuden testivuoden TRY2012 kuukaudet (harmaa tausta) valittuina Sodankylän havaintoaineiston perusteella säämuuttujan painotusta käyttäen. Lisäksi on näytetty valinnan loppusuoralle päässeet muut kuukaudet (katso teksti).

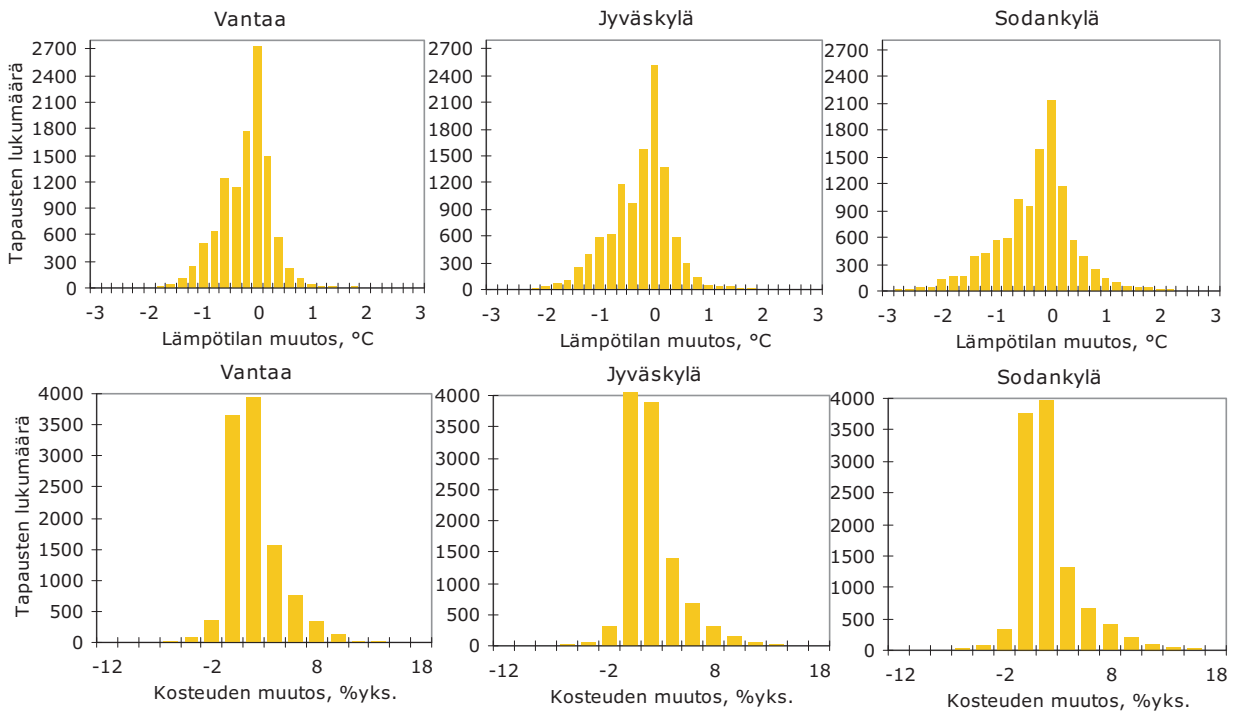
Järjestys	Vuosi											
	Tammi- kuu	Helmi- kuu	Maalis- kuu	Huhti- kuu	Touko- kuu	Kesä- kuu	Heinä- kuu	Elo- kuu	Syys- kuu	Loka- kuu	Marras- kuu	Joulu- kuu
Lämpötilan perusteella tehty valikoima												
1.	1988	1999	1985	2009	2007	1985	1982	2003	1998	1981	1981	2003
2.	1998	1983	2004	1984	1986	1997	2001	1994	2003	1995	1985	2000
3.	2000	1997	2000	2001	1981	2007	1994	2004	1985	1991	2008	1997
4.	2007	1988	2002	2008	1988	1984	1983	1990	1982	2003	2007	1998
5.	1981	2009	1999	2004	2005	2009	1980	2001	1980	1988	2006	2009
Säteilyn perusteella tehty valikoima												
1.	1997	2004	2008	1987	1989	2001	1987	2005	1988	1990	2007	1991
2.	1994	1983	2002	2005	1997	1980	2009	1984	2007	2008	1997	1983
3.	1990	1993	2000	1999	1995	1999	2000	1999	1989	1985	1994	1982
4.	1989	2009	1998	1997	1993	1988	1991	1990	1991	1988	1984	1990
5.	1998	2006	1994	1993	2001	2006	1997	2000	1994	1995	1992	1999
Lämpötilan, kosteuden, säteilyn ja tuulen perusteella tehty valikoima												
1.	1998	1983	1985	1984	2007	1985	1991	1990	1985	1995	1981	2003
2.	2000	1999	2004	2009	2005	1988	1983	1994	2003	1988	1985	2000
3.	1988	1997	2000	2008	1992	2008	2009	2004	1982	1983	2008	1997
4.	2007	1988	2002	2001	2000	1984	1982	2001	1989	1985	2007	1998
5.	1997	2009	1999	2004	2002	2009	2000	2003	1998	1991	2006	2009

5.4 Vaihe 4: Testivuoden tuntiaineistot ja eri kuukausien liittäminen yhteen

Testivuoden tuntiaineistot muodostettiin lämpötilalle, suhteelliselle kosteudelle ja tuulelle kolmen tunnin välein tehtyihin säähavaintoihin pohjautuen. Lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja tuulen nopeuden arvot tunneittain interpoloitiin lineaarisesti edellisen ja seuraavan havaintohetken arvoista. Tuulen suunta määritettiin seuraavasti. Tuulivektori jaettiin ensin pohjois- ja itäsuuntaisiin komponentteihin. Sitten interpoloitiin kumpikin komponentti erikseen havaintohetkien välille ja laskettiin saatujen tuntiarvojen perusteella tunnittaiset suunnat. Lopuksi tehtiin pyöristys lähimpään kymmenlukuun ottaen huomioon, että pohjoistuulilla asteikossa on epäjatkuvuuskohta lukeman muuttuessa 360 asteesta 10 asteeseen. Säteilysuureita ei tarvinnut interpoloida, vaan ne laskettiin tunnin välein tehdyistä kokonaissäteilyn ja hajasäteilyn mittauksista (liite 3).

Koska energialaskennan testivuoden kuukaudet valittiin eri vuosilta, kuukauden vaihtuessa testivuosiaineistojen säämuuttujissa esiintyi alun perin porrasmaisia hyppäyksiä. Ennen tasoituksia epäjatkuvuudet olivat suuria etenkin lämpötiloissa ja suhteellisissa kosteuksissa. Säteilysuureiden ja tuulen mahdolliset äkilliset hyppäykset eivät ole testivuosiaineiston käytön kannalta yhtä merkittäviä, sillä auringonsäteilyteho on vuorokauden vaihtuessa nolla tai hyvin lähellä nollaa, ja tuulen muuttuminen voi todellisuudessa olla nopeaa peräkkäisten havaintohetkien välillä.

Porrasmaisten hyppäysten tasoittamista varten arvioitiin aluksi, kuinka yleisiä lämpötilan ja suhteellisen kosteuden nopeat muutokset ovat ajanhetkien kello 21 ja 00 välillä. Näiden ajanhetkien välinen lämpötilaero ja suhteellisen kosteuden erotus laskettiin Vantaalla, Jyväskylässä ja Sodankylässä vuosina 1980–2009 kolmen tunnin välein tehtyjen säähavaintojen perusteella. Erotus jaettiin kolmella, jotta saataisiin sääsuureen keskimääräinen muutos tunnissa kello 23 ja 00 välillä. Näin muodostettujen muutosnopeuksien frekvenssijakaumat on esitetty kuvassa 5.12.



Kuva 5.12. Kello 23 ja tuntia myöhemmin kello 00 vallinneiden lämpötilojen (ylhällä) ja suhteellisten kosteuksien (alhaalla) erotuksien jakaumat v. 1980–2009 Vantaalla (vas.), Jyväskylässä (kesk.) ja Sodankylässä (oik.).

Kuvasta 5.12 ilmenee, että lämpötilaerojen ja suhteellisen kosteuden erotuksien jakaumat eivät ole symmetrisiä. Tämä johtuu siitä, että yöaikaan juuri ennen vuorokauden vaihtumista (23–00) lämpötila on tyypillisesti laskemassa ja suhteellinen kosteus nousemassa. Havaittujen frekvenssijakaumien mukaan 95 % erotuksista osuu taulukossa 5.10 esitetyille väleille.

Taulukko 5.10. Vuosina 1980–2009 kello 23 ja 00 vallinneiden lämpötilojen ja suhteellisten kosteuden erotuksien frekvenssijakaumien perusteella määritetyt prosenttipisteet, joiden väliin osuu 95% havainnoista. Alaraja vastaa prosenttipistettä 2,5 ja yläraja 97,5.

	Vantaa	Jyväskylä	Sodankylä
Lämpötila, °C			
Alaraja	-1,3	-1,6	-1,9
Yläraja	0,6	0,7	1,0
Suhteellinen kosteus, %			
Alaraja	-3	-2	-3
Yläraja	7	8	9

Seuraavaksi tarkasteltiin säämuuttujien porrasmaisia hyppäyksiä valittujen testikuukausien vaihtuessa. Lämpötilan arvo kunkin valitun testikuukauden viimeisenä päivänä klo 23 ja seuraavan kuukauden ensimmäisenä päivänä klo 00 sekä näiden erotukset on esitetty taulukossa 5.11. Suhteellisen kosteuden vastaavat arvot on esitetty taulukossa 5.12.

Taulukko 5.11. Vantaan, Jyväskylän ja Sodankylän valittujen testikuukausien lämpötilat kuukauden viimeisenä päivänä klo 23 ja seuraavan kuukauden ensimmäisenä päivänä klo 00 sekä näiden erotukset. Erotukset, jotka jäävät havaittujen erotusten jakaumien prosenttipisteiden 2,5 ja 97,5 ulkopuolelle (taulukko 5.10), on korostettu harmaalla.

Kuukausi	Lämpötila °C								
	Vantaa			Jyväskylä			Sodankylä		
	klo 23	klo 00	erotus	klo 23	klo 00	erotus	klo 23	klo 00	erotus
Tammi-helmikuu	1,8	-17,5	-19,3	-9,4	-3,3	6,1	-27,5	-19,8	7,7
Helmi-maaliskuu	0,0	-14,0	-14,0	-5,6	-7,5	-1,9	-12,5	-19,6	-7,1
Maalis-huhtikuu	0,1	0,0	-0,1	5,9	-3,8	-9,7	-7,5	-5,6	1,9
Huhti-toukokuu	4,2	5,5	1,3	4,0	8,2	4,2	1,7	-3,9	-5,6
Touko-kesäkuu	10,8	8,1	-2,7	8,5	8,1	-0,4	5,2	3,7	-1,5
Kesä-heinäkuu	13,5	15,1	1,6	11,0	14,5	3,5	16,8	12,3	-4,5
Heinä-elokuu	17,1	21,8	4,7	16,6	16,5	-0,1	10,5	12,7	2,2
Elo-syyskuu	7,2	12,8	5,6	3,9	11,4	7,5	8,3	1,9	-6,4
Syys-lokakuu	7,5	10,0	2,5	1,8	0,5	-1,3	3,7	1,5	-2,2
Loka-marraskuu	0,7	3,4	2,7	2,1	2,9	0,8	-11,1	-15,8	-4,7
Marras-joulukuu	1,1	-2,0	-3,1	-5,5	-15,5	-10,0	-27,0	-30,5	-3,5
Joulu-tammikuu	-0,6	-3,1	-2,5	-12,6	-11,8	0,8	-13,8	-19,0	-5,2

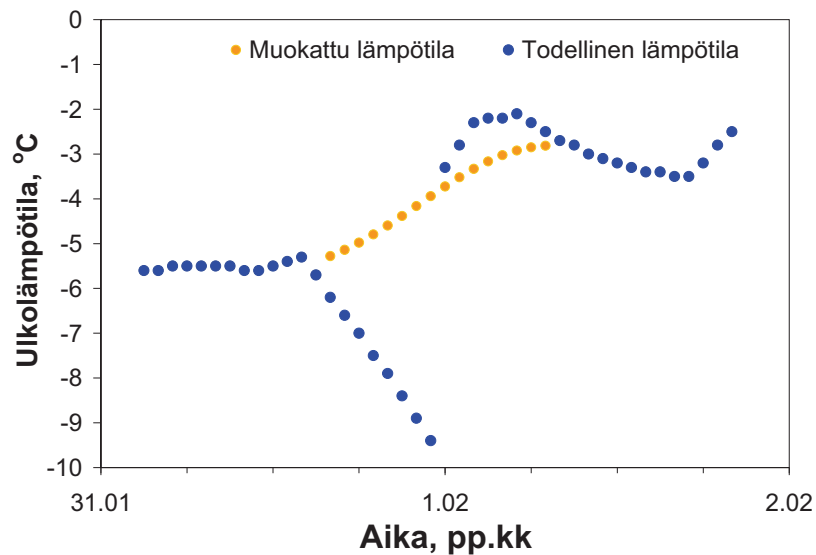
Suurin osa taulukoissa 5.11–5.12 esitetyistä erotuksista on suurempia kuin mitä kuvan 5.12 mukaan on todellisuudessa havaittu jaksolla 1980–2009. Erotukset, jotka eivät osu taulukossa 5.10 annettujen ala- ja ylärajojen väliin, on merkitty taulukoissa harmaalla taustavärillä. Nämä epäjatkuvuudet täytyy tasoittaa, jottei testikuukausien viimeisen ja ensimmäisen päivän välille tulisi liian jyrkkiä sääsuureiden muutoksia.

Tasointa tehtiin useimmissa tapauksissa siten, että jokaisen kuukauden kahdeksan ensimmäisen ja viimeisen tunnin lämpötiloja muutettiin kuudennen asteen polynomisovituksen mukaisesti (kuva 5.13). Jos lämpötilan muutos kuukauden vaihtuessa oli erityisen suuri,

muokattujen tuntien lukumäärä oli vastaavasti suurempi, 17–25 tuntia. Ilman suhteelliselle kosteudelle käytettiin kuukausien vaihtuessa suhteellisen kosteuden lineaarista interpolointia niille tunneille, joiden lämpötilan arvoa oli muokattu.

Taulukko 5.12 Vantaan, Jyväskylän ja Sodankylän valittujen testikuukausien suhteelliset kosteudet viimeisenä päivänä klo 23 ja seuraavan kuukauden ensimmäisenä päivänä klo 00 sekä näiden erotukset. Erotukset, jotka ovat itseisarvoltaan suurempia kuin 95 % havaituista erotuksista, on korostettu harmaalla.

Kuukausi	Suhteellinen kosteus %								
	Vantaa			Jyväskylä			Sodankylä		
	klo 23	klo 00	erotus	klo 23	klo 00	erotus	klo 23	klo 00	erotus
Tammi-helmikuu	95	67	-28	85	96	11	83	80	-3
Helmi-maaliskuu	85	84	-1	91	95	4	88	81	-7
Maalis-huhtikuu	86	95	9	76	73	-3	74	87	13
Huhti-toukokuu	58	44	-14	64	82	18	83	72	-11
Touko-kesäkuu	72	93	21	66	75	9	61	58	-3
Kesä-heinäkuu	91	87	-4	72	78	6	88	84	-4
Heinä-elokuu	65	84	19	87	86	-1	93	90	-3
Elo-syyskuu	79	87	8	95	70	-25	90	79	-11
Syys-lokakuu	95	94	-1	98	82	-16	96	96	0
Loka-marraskuu	98	95	-3	96	96	0	81	86	5
Marras-joulukuu	95	91	-4	87	84	-3	79	77	-2
Joulu-tammikuu	83	94	11	88	88	0	89	77	-12

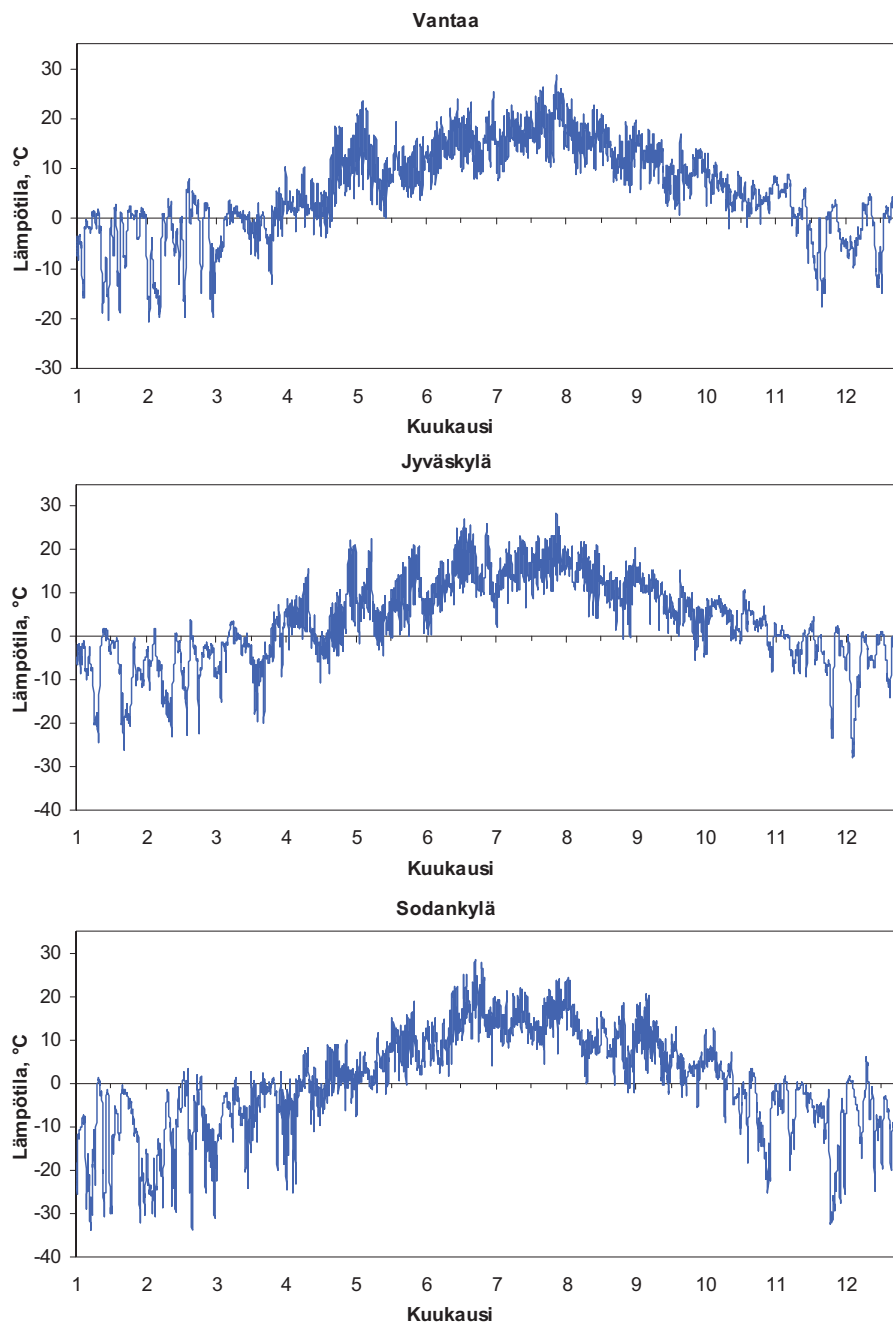


Kuva 5.13 Esimerkki tammikuun ja helmikuun lämpötilojen liittämisestä yhteen.

6 Rakennusten uusi energialaskennan testivuosi 2012

6.1 Uudet sääaineistot

Rakennusten energianlaskennan uuden testivuoden TRY2012 tunnitaitisten sääaineistojen mukaiset ilman lämpötilan aikasarjat lämpötilavyöhykkeillä I–II (Vantaa), III (Jyväskylä) ja IV (Sodankylä) on esitetty kuvassa 6.1. Aineistot sisältävät vastaavat aikasarjat myös suhteelliselle kosteudelle, tuulen nopeudelle ja suunnalle sekä auringon kokonaissäteilylle, hajasäteilylle ja sädettä vastaan kohtisuoran pinnan saamalle suoralle säteilylle. Näiden säämuuttujien keskimääräiset arvot kalenterikuukausittain on esitetty taulukossa 6.1. Sääaineistosta lasketut lämmitystarveluvut (liite 1) on myös otettu mukaan tähän taulukkoon.



Kuva 6.1 Uuden testivuoden mukainen lämpötila (yksikkö °C, yläkuva) Vantaalla (vyöhykkeet I–II), Jyväskylässä (vyöhyke III) ja Sodankylässä (vyöhyke IV).

Taulukko 6.1 Säämuuttujien keskimääräiset arvot kuukausittain vyöhykkeillä I–II (Vantaa), III (Jyväskylä) ja IV (Sodankylä) energialaskennan testivuotena TRY2012. (1 MJ = 0.278 kWh)

	Keskimääräinen lämpötila T , °C			Keskimääräinen suhteellinen kosteus RH , %			Auringon kokonaissäteilyenergia vaakatasolle G_{rad} , MJ/m ²			Normitukseen käytettävä lämmitystarveluku S_{17} , Kd		
	I+II	III	IV	I+II	III	IV	I+II	III	IV	I+II	III	IV
Tammikuu	-4,0	-8,0	-13,1	89	88	86	22,3	19,4	5,0	650	775	932
Helmikuu	-4,5	-7,1	-12,6	83	90	79	80,6	72,4	49,0	602	675	830
Maaliskuu	-2,6	-3,5	-6,9	82	85	82	231,5	186,8	172,8	607	637	740
Huhtikuu	4,5	2,4	-1,6	67	74	66	431,6	370,4	435,6	354	437	557
Toukokuu	10,8	8,8	5,4	63	61	69	595,8	617,0	461,2	117	210	337
Kesäkuu	14,2	13,4	13,0	72	66	62	607,0	572,8	555,1	9	60	115
Heinäkuu	17,3	15,8	14,4	69	73	70	651,2	569,5	527,0	0	22	30
Elokuu	16,1	13,8	12,1	76	81	81	456,1	410,0	340,2	31	78	138
Syyskuu	10,5	9,2	6,6	79	82	82	295,2	256,0	229,3	161	218	303
Lokakuu	6,2	4,1	0,2	91	87	84	94,3	91,1	59,8	331	401	522
Marraskuu	0,5	-1,8	-6,8	89	94	89	29,2	26,3	10,8	495	563	714
Joulukuu	-2,2	-5,9	-10,1	87	89	87	15,8	11,5	0,7	595	711	839
Koko vuosi	5,6	3,4	0,1	79	81	78	3511	3203	2847	3952	4787	6058

Taulukko 6.1 jatkuu

	Suoran säteilyn kokonaismäärä auringon sädetä vastaan kohtisuoralle pinnalle $RDIF$, MJ/m ²			Hajasäteilyn kokonaismäärä vaakatasolle $RDIF$, MJ/m ²			Keskimääräinen tuulen nopeus WS , m/s		
	I+II	III	IV	I+II	III	IV	I+II	III	IV
Tammikuu	25,2	11,2	0,0	19,1	18,4	5,0	4,3	3,2	2,7
Helmikuu	102,6	124,2	58,0	57,2	46,4	39,6	4,6	2,6	2,9
Maaliskuu	258,8	173,5	180,7	133,6	125,3	122,8	4,1	3,2	3,3
Huhtikuu	514,8	404,6	609,8	185,4	182,9	192,2	4,3	2,8	2,8
Toukokuu	704,9	725,8	499,0	218,5	244,8	232,6	4,1	3,0	2,8
Kesäkuu	637,9	525,6	591,8	255,6	283,0	268,9	4,0	3,1	2,8
Heinäkuu	768,2	609,1	524,9	238,3	243,0	267,1	3,9	2,4	3,0
Elokuu	495,7	421,9	356,0	208,4	204,5	186,8	4,2	2,3	2,3
Syyskuu	409,0	357,5	384,5	132,5	121,0	101,2	3,9	3,5	2,6
Lokakuu	93,6	127,4	76,3	67,7	56,2	45,7	4,1	3,0	2,7
Marraskuu	36,4	30,2	9,0	24,1	22,0	10,1	4,0	3,2	3,0
Joulukuu	28,4	4,0	0,0	13,0	10,8	0,7	4,4	3,1	2,5
Koko vuosi	4076	3515	3290	1555	1559	1472	4,2	3,0	2,8

Kuukausittaisen energiankulutuksen laskennassa käytettäviä ulkoilman lämpötilojen esiintymistiheyksiä pysyvyysarvoina ei aiemmasta käytännöstä poiketen esitetä Suomen rakentamismääräyskokoelman liiteaineistona. Sen sijaan ne ovat nähtävissä uuden testivuoden sääaineistoista laskettuina tämän raportin liitteessä 7. Tulosten mukaan esimerkiksi Vantaalla tavanomaisen tammikuun tunnitaiset lämpötilat ovat kaikki kylmempinä kuin +3 astetta ja 0,27 % niistä kylmempinä kuin -20 astetta. Tavanomaista kylmempinä tai lauhempina kuukausina pysyvyysarvot voivat luonnollisesti poiketa liitteen 7 tuloksista huomattavastikin.

Mitoitaviin lämpötiloihin ei tehty uuden energialaskennan testivuoden valitsemisen myötä muutoksia, vaan ne ovat edelleen taulukon 3.2 mukaisesti -26 °C vyöhykkeellä I, -29 °C vyöhykkeellä II, -32 °C vyöhykkeellä III ja -38 °C vyöhykkeellä IV.

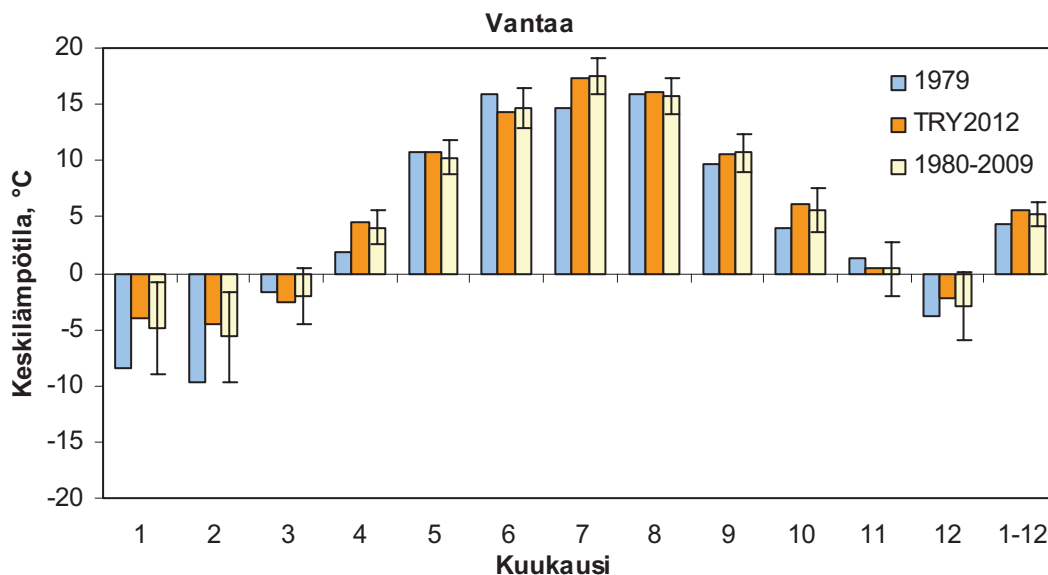
Eri ilmansuuntiin osoitaville pystypinnoille tulevan auringon kokonaissäteilyenergian määrät testivuoden eri kuukausina on esitetty liitteen 8 taulukoissa L8.1–L8.3. Vastaavat tulokset 45 astetta kallistetuille pinnoille nähdään puolestaan taulukoista L8.4–L8.6.

6.2 Uuden testivuoden vertailu vuosiin 1979 ja 1980-2009

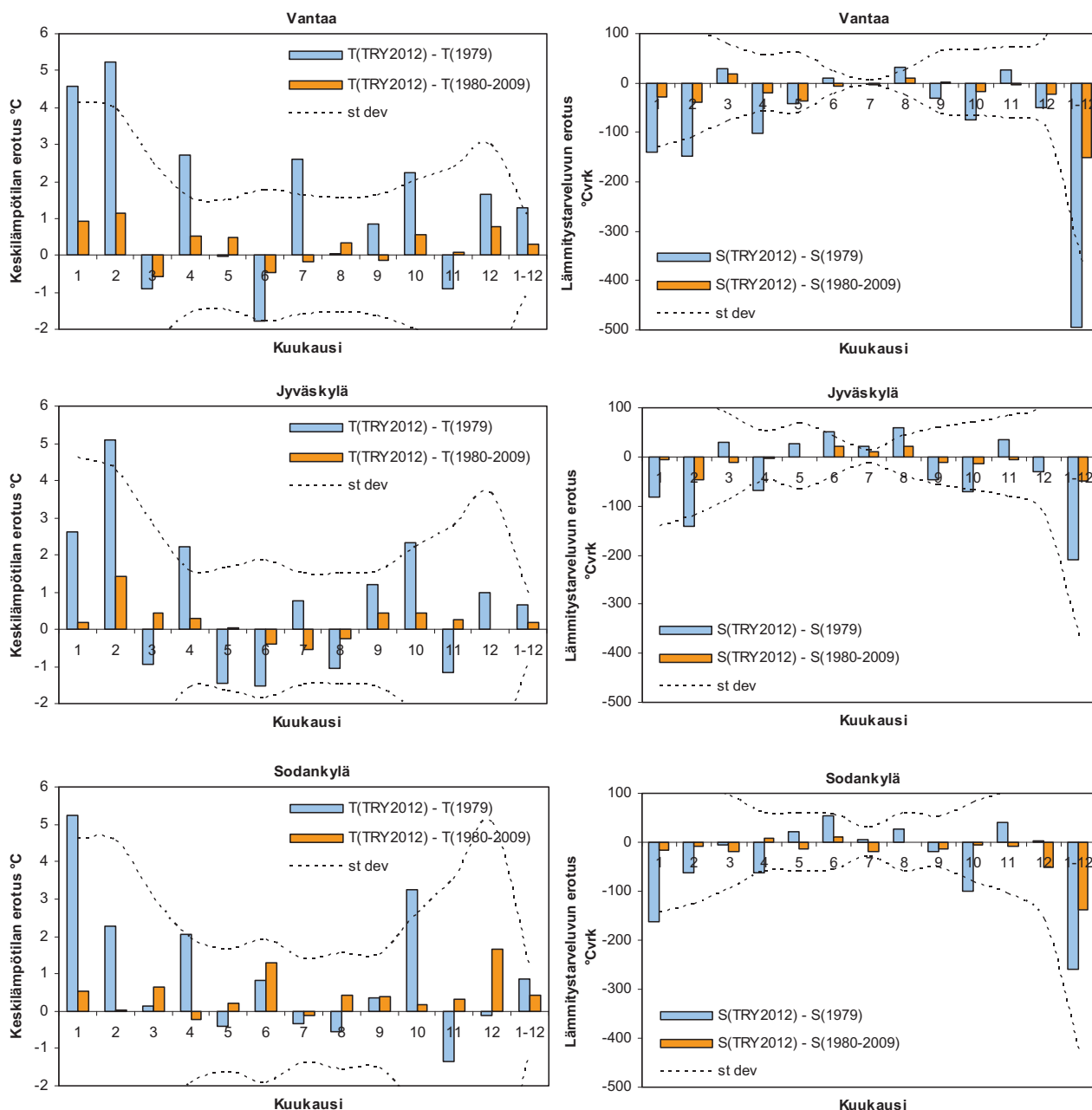
Seuraavaksi verrataan uutta testivuotta TRY2012 aikaisemmin käytössä olleeseen testivuoteen 1979 (Tammelin ja Erkiö, 1987) sekä jakson 1980–2009 keskimääräiseen ilmastoon. Kuten luvussa 1.3 todettiin, vanhan testivuoden soveltuvuutta rakennusten energialaskelmiin huononsi se, että vuosi 1979 alkoi kylmänä ja myös heinäkuu oli maan etelä- ja keskiosassa viileä ja sateinen. Koska ilmasto on lisäksi lämmennyt vanhan testivuoden valinnassa käytetyn jakson 1968–1983 jälkeen, uuden ja vanhan testivuoden voidaan odottaa poikkeavan toisistaan. Toisaalta on syytä tarkastella, kuinka hyvin saavutettiin TRY2012:n valintamenetelmän tavoite, jonka mukaan uuden testivuoden sääolojen tulisi olla mahdollisimman lähellä pitkäaikaisia keskiarvoja (1980–2009).

Uuden testivuoden TRY2012 mukaiset Vantaan (vyöhykkeet I–II) keskilämpötilat on esitetty kuvassa 6.2 (ja liitteen 6 taulukossa L6.1) kalenterikuukausittain yhdessä vanhan testivuoden 1979 ja koko 30-vuotisjakson vastaavien keskimääräisten arvojen kanssa. Vyöhykkeiden III ja IV vastaavat tulokset on esitetty liitteen 6 kuvissa L6.1 ja L6.4. Koska kuukausikeskilämpötilat vaihtelevat vuodesta toiseen selvästi enemmän talvella kuin kesällä, on vertailun helpottamiseksi näissä kuvissa esitetty myös yhden keskihajonnan verran pitkän ajan keskiarvoa korkeammat tai matalammat lämpötilat. Samoin keskihajonnat on merkitty kuvaan 6.3, joka esittää kaikille lämpötilavyöhykkeille kuukauden keskilämpötilojen ja lämmitystarveluvun erotukset uuden ja vanhan testivuoden välillä sekä niiden poikkeamat pitkän ajan keskiarvoon nähden.

Testivuosi TRY2012 on vyöhykkeestä riippuen 0,7–1,3 °C lämpimämpi vuosi 1979. Tämä näkyy myös lämmitystarveluvuissa, jotka ovat uutena testivuotena 200–500 yksikköä (4–11 %) pienempiä kuin vuonna 1979. Tammi-, helmi-, huhti- ja lokakuiden sekä maan eteläosassa myös heinäkuun keskilämpötilat ovat uuden testivuoden mukaan vähintään kaksi, jopa viisi astetta korkeampia kuin vuonna 1979. Etelässä kesäkuu ja Keski-Suomessa myös toukokuu ovat puolestaan noin 1,5 °C viileämpiä kuin v. 1979. Useimmat näistä mainituista eroista ovat vähintään noin yhden kuukausikeskilämpötilojen keskihajonnan suuruisia. Eniten uusi ja vanha testivuosi eroavat lämpötiloiltaan toisistaan Etelä-Suomessa.



Kuva 6.2 Kuukauden keskilämpötilat Vantaan sääaineiston mukaan uutena (TRY2012, vyöhykkeet I–II) ja vanhana (1979, vyöhyke I) testivuotena. Lisäksi on esitetty jakson 1980-2009 pitkäaikaiset keskiarvot sekä yhden keskihajonnan suuruiset poikkeamat siitä kylmään ja lämpimään suuntaan. Vuoden keskilämpötila esitetään pylväillä ”1–12”.

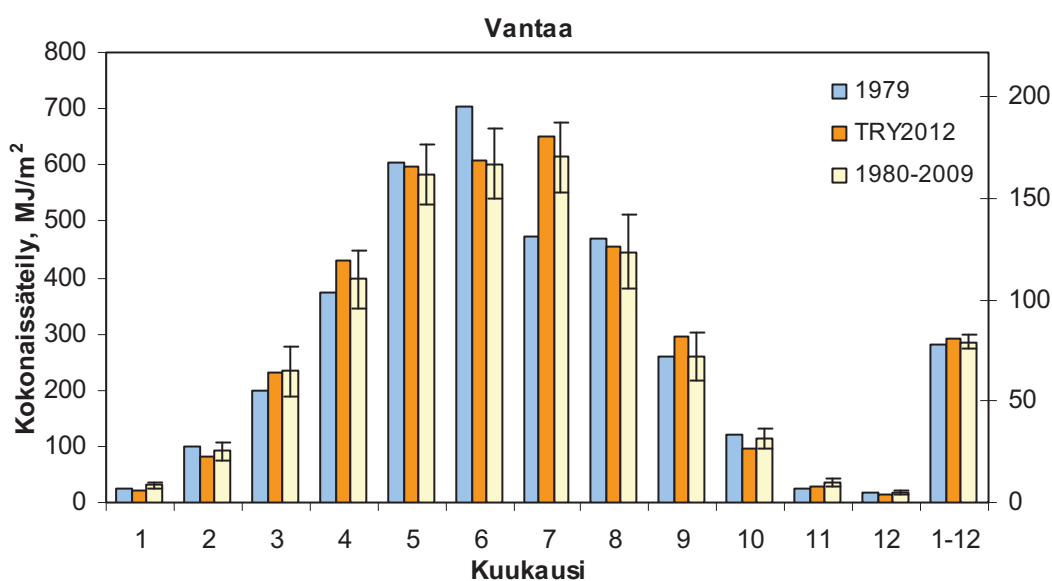


Kuva 6.3 Pylvää: Uuden testivuoden (TRY2012) kuukauden keskilämpötilojen (vasen) ja lämmitystarvelukujen (oikea) erotus testivuoteen 1979 sekä pitkän ajan (1980–2009) keskiarvoon nähden Vantaalla (ylin), Jyväskylässä (keskellä) ja Sodankylässä (alin). Viimeinen pylvä esittää vuosikeskilämpötilojen erotusta (vasen) ja vuotuisen yhteenlasketun lämmitystarveluvun erotusta (oikea). Katkoviivat: jakson 1980–2009 kuukausi- ja vuosikeskiarvojen keskihajonnan verran nollasta poikkeavat arvot.

Uuden testivuoden keskilämpötila on vyöhykkeestä riippuen 0,2–0,5 °C korkeampi kuin 30-vuotisjakson 1980–2009 keskiarvo. Kuukauden keskilämpötilat eroavat pitkän ajan keskiarvoista eniten maan eteläosassa tammi- ja helmikuussa, keskiosassa helmikuussa ja maan pohjoisosassa kesä- ja joulukuussa, jotka kaikki ovat 0,9–1,7 °C keskimääräistä lämpimämpiä. Poikkeamat jäävät kuitenkin pieniksi vuosien väliseen vaihteluun verrattuna. Ne ovat suuruudeltaan enimmillään noin kolmasosa keskilämpötilojen keskihajonnasta paitsi Sodankylässä kesäkuussa, jolloin poikkeama on kaksi kolmasosaa keskihajonnasta. Näin ollen

lämpöolot ovat varsin lähellä keskimääräisiä arvoja ja lämmitystarveluvut jäävät vain 50–140 yksikköä eli 1-2 % pitkäaikaisia keskiarvoja pienemmiksi.

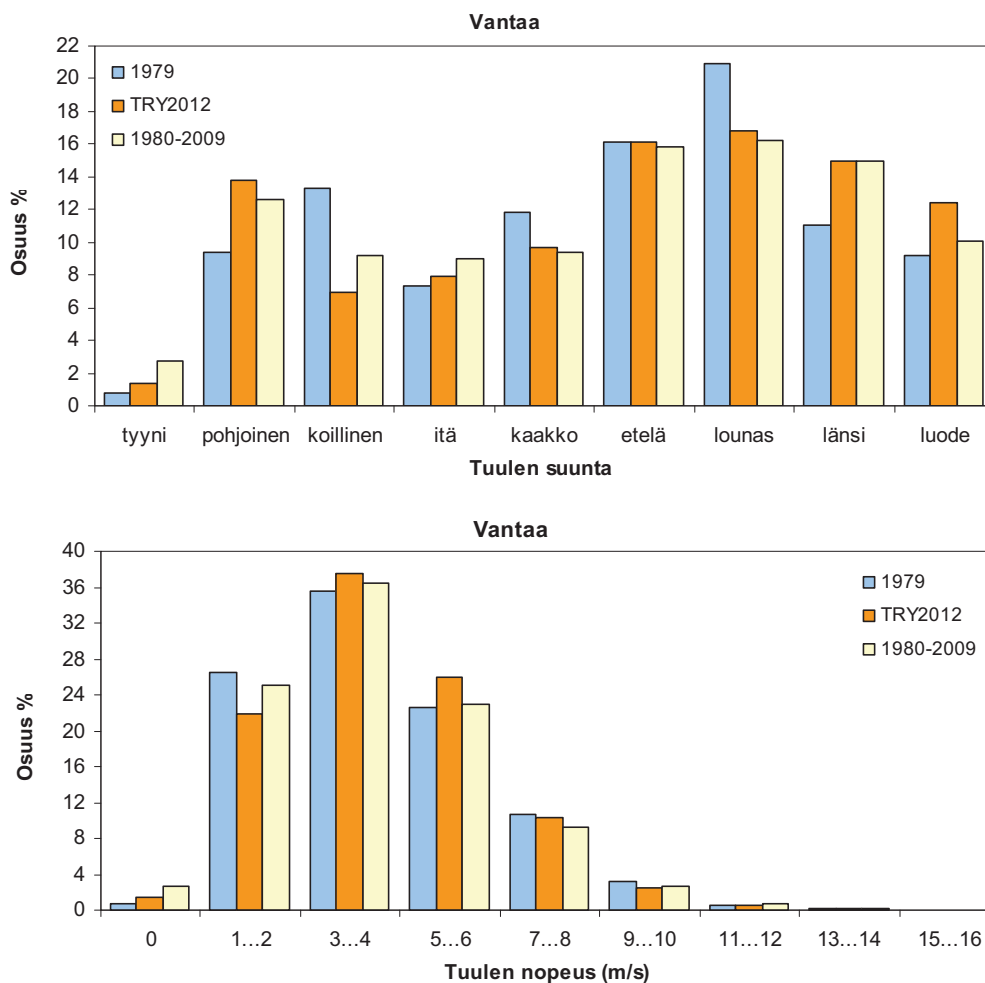
Auringon kokonaissäteilyenergian yhteismäärä maaliskuu–lokakuussa on uutena testivuotena paikasta riippuen 4–6 % suurempi kuin vanhana testivuotena 1979 ja 1–4 % suurempi kuin vuosina 1980–2009 keskimäärin (kuva 6.4 ja liite 6). Suurimmillaan lisäys vuoteen 1979 verrattuna on Vantaalla heinäkuussa (lähes 180 MJ/m^2 eli +37 %), Jyväskylässä toukokuussa (lähes 90 MJ/m^2 ; +17 %) ja Sodankylässä huhtikuussa (noin 85 MJ/m^2 , +24%). Vantaalla taas säteilyä saadaan kesäkuussa noin 95 MJ/m^2 (-14 %) vähemmän uuden kuin vanhan testivuoden mukaan. Vantaan TRY2012:n kesä- ja heinäkuun arvot ovat lähellä pitkäaikaisia keskiarvoja, mutta Jyväskylän toukokuun, Sodankylän huhtikuun ja molempien paikkojen syyskuun säteilyn määrät ylittävät selvästi myös nämä vertailuarvot (liite 6). Toukokuun säteilysumma Jyväskylässä on testivuonna 44 MJ/m^2 suurempi kuin kesäkuun, kun sen pitkäaikaiskeskiarvon mukaan pitäisi olla noin 20 MJ/m^2 pienempi.



Kuva 6.4 Auringon kokonaissäteilyenergia vaakatasolle kalenterikuukausittain Vantaan sääaineiston mukaan uutena (TRY2012, vyöhykkeet I–II) ja vanhana (1979, vyöhyke I) testivuotena. Lisäksi on esitetty jakson 1980–2009 pitkäaikaiset keskiarvot sekä yhden keskijakson suuret poikkeamat siitä valoisaan ja hämärään suuntaan. Kalenterikuukausien keskimääräinen säteilysumma esitetään viimeisillä pylväillä ”1–12”. Oikeanpuoleisella pystyakselilla yksikkönä on kWh (1 kWh = 3,6 MJ).

Testivuoden tuulen nopeuden ja suunnan jakautumista eri luokkiin verrataan vanhaan testivuoteen sekä jaksoon 1980–2009 kuvassa 6.5 sekä kuvissa L6.3 ja L6.6. Koko vuoden keskimääräinen tuulen nopeus eroaa uuden ja vanhan testivuoden välillä vain yhden desimaalin verran vyöhykkeillä I–III, eikä myöskään vyöhykkeellä IV poikkeama ole suurempi kuin $0,4 \text{ m s}^{-1}$. Vaikka tuulen suuntaa ei otettu lainkaan huomioon testikuukausia valittaessa, kuvista käy ilmi, että testivuosiaineiston mukainen tuulen suuntajakauma on varsin lähellä koko jakson 1980–2009 keskimääräistä jakaumaa.

Uuden testivuoden sääaineiston mukainen suhteellinen kosteus poikkeaa vuoden 1979 arvoista etenkin Vantaalla kesäkuussa (11 prosenttiyksikköä suurempi) ja heinäkuussa (14 prosenttiyksikköä pienempi). Sodankylässä suhteellinen kosteus oli erilainen etenkin huhtikuussa: uuden testivuoden mukaan kuukauden keskimääräinen suhteellinen kosteus on 8 prosenttiyksikköä pienempi kuin vuonna 1979.

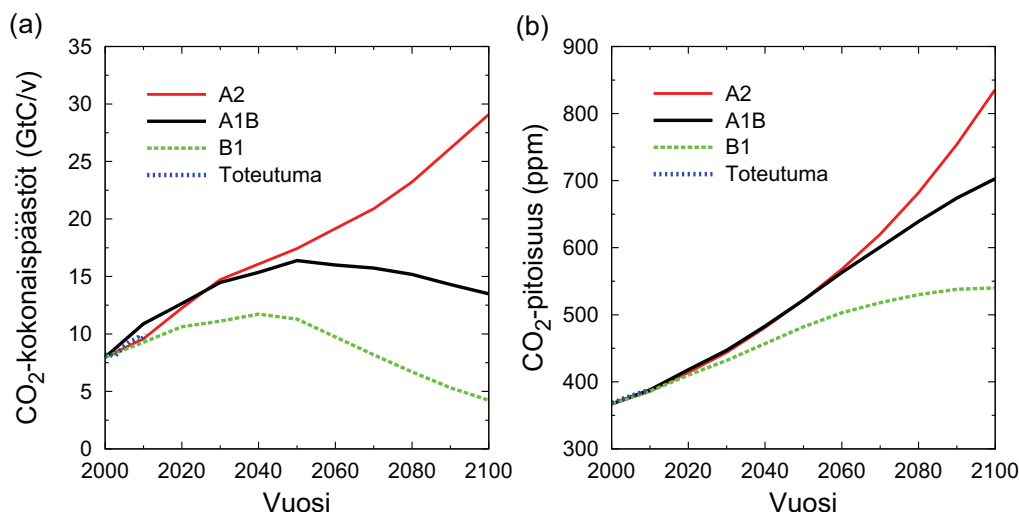


Kuva 6.5 Tuulen suunnan jakautuminen eri ilmansuuntiin (yläkuva) ja nopeuden jakautuminen eri voimakkuusluokkiin (alakuva) Vantaalla uuden (TRY2012, vyöhykkeet I–II) ja vanhan (1979, vyöhyke I) testivuoden mukaan sekä 30-vuotisjaksona 1980-2009.

7 Energialaskennan tulevaisuuden testivuoden laadinta

7.1 Kasvihuonekaasujen skenaariot ja ilmastomallit

Tulevaisuutta kuvaavat testivuodet Suomen rakennusten energialaskentaa varten muodostettiin käyttämällä arvioita odotettavissa olevasta ilmastonmuutoksesta Suomessa. Muutosskenaariot perustuvat arvioihin tulevasta maailmanlaajuisista kasvihuonekaasujen ja pienhiukkasten päästöistä, joihin puolestaan vaikuttaa taloudellinen, teknologinen ja yhteiskunnallinen kehitys maapallolla, kuten väestönkasvu, energian kulutus ja tuotantotavat sekä maankäytön muutokset. Kasvihuonekaasujen ja pienhiukkasten kertyminen ilmakehään riippuu myös näiden aineiden kierrosta ilmakehän, merien ja biosfäärin välillä. Kasvihuonekaasujen pitoisuudet ilmakehässä seuraavat päästöjä viiveellä. Toisin sanoen vielä päästöjen joskus alettua pienentyä pitoisuuksien kasvu edelleen jatkuu, joskin vähitellen hidastuen. Kuvassa 7.1 on esitetty kolme Hallitustenvälisen ilmastopaneelin (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) vaihtoehtoista arvioita hiilidioksidin päästöjen ja pitoisuuksien kehityksestä tällä vuosisadalla. Koska jo tähän mennessä ilmakehään joutuneet kasvihuonekaasut pysyvät siellä pitkään, näiden ns. SRES A2-, A1B- ja B1-skenaarioiden väliset erot ovat vielä lähi-vuosikymmeninä varsin pieniä, mutta kasvavat vuosisadan jälkipuoliskolla huomattaviksi.



Kuva 7.1 Fossiilisen polttoaineiden käytön, sementin tuotannon ja maankäytön muutosten aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen (a) ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden (b) arvioitu ajallinen kehitys kolmen SRES-skenaarion (A2, A1B ja B1) mukaan (IPCC, 2001). Lisäksi on näytetty toteutuneet päästöt (a) ja pitoisuudet (b) vuoteen 2010 asti Tyndall-keskuksen ja NOAA/ESRL:n verkkosivuillaan antamien lukemien perusteella.

Ilmakehän muuttuvan koostumuksen vaikutusta ilmastoon tutkittiin eri puolilla maapalloa sijaitsevien ilmastomallinnuskeskusten tekemien simulaatioiden avulla. Tulevaisuuden testi-vuosiaineistot vuosia 2030, 2050 ja 2100 vastaavassa ilmastossa laadittiin sääsuureista riip-puen 7–19 maailmanlaajuisen ilmastomallin tulosten pohjalta olettaen, että kasvihuonekaasu-jen ja pienhiukkasten pitoisuuksien kasvu ilmakehässä noudattaa A2-skenaariota (liite 9). Tosin vuoden 2030 tienoilla eri kasvihuonekaasuskenaarioihin perustuvien mallikokeiden tulokset ovat vielä varsin lähellä toisiaan, ja mahdolliset erot aiheutuvat ennemminkin ilmas-ton luontaisesta vaihtelusta ja mallien eroavaisuuksista kuin pitoisuusskenaarioiden eroista. Tuleviin päästöihin liittyvä epävarmuus kasvattaa ilmastomuutosta koskeviin ennusteisiin väistämättä sisältyvää epävarmuutta vasta vähitellen, kun taas ilmaston luonnollinen vaihtelu voi jo nykyään aika-ajoin kiihdyttää ja välillä taas jarruttaa ilmaston muuttumista. Toisen suu-ren epävarmuuden lähteen ilmastoa ennustettaessa muodostavat käytetyt ilmastomallit. Mallit ovat kyllä varsin yksimielisiä monien meteorologisten suureiden muutosten suunnasta, mutta muutoksen suuruus voi vaihdella kovasti mallista toiseen. Parhaana arviona muutoksen suuruudesta voidaan pitää eri mallien keskiarvona saatuja tuloksia.

7.2 Ilmastomuutoksen arvioiminen

Tulevaisuutta koskevat rakennusten energialaskelmat keskittyvät tässä raportissa vuoden 2030 ilmastoon. Tulevaisuuden testivuoden TRY2030 laadinnan pohjana olivat ilmastomallien antamat arviot siitä, miten nopeasti ilmasto muuttuu ajanjaksosta 1980–2009 vuotta 2030 ympäröivään 30-vuotisjaksoon (2015–2044) mennessä. Vuosia 2050 ja 2100 koskevia testi-vuosia laadittaessa tarkasteltiin vastaavasti kauempana tulevaisuudessa olevia 30-vuotisjak-soja (liite 10). Muutosarvioiden avulla muokattiin ajanjaksoa 1980–2009 kuvaavan testivuoden TRY2012 tunnin välein esitettyjä säähavaintotietoja. Lähestymistapaa kutsutaan delta-menetelmäksi. Oletuksena on, että sään vaihtelu tunnista ja päivästä toiseen säilyy peruspiir-teiltään samantyyppisenä kuin havainnoista kootun testivuoden aikana. Jokaista hetkellistä säätilaa muunnetaan siten, että näin saadun tulevan ilmaston tilastolliset ominaisuudet vastai-sivat mahdollisimman hyvin mallien ennustamia muutoksia. Säätilojen jakauma, kuten korkea- ja matalapaineiden esiintyminen, saattaa kyllä muuttua myös kvalitatiivisesti. Tätä mahdollisuutta ei ole voitu ottaa huomioon, mutta sen sijaan pyrkimyksenä on ollut kuvata

ilmastonmuutos sen mukaisena kuin mallit sen ennustavat, mutta samalla säilyttää säätilojen vaihtelu ajanhetkeestä toiseen kvalitatiivisesti nykyisen kaltaisena.

Vaikka ilman kosteudella ja tuulella on Suomessa selvästi vähemmän vaikutusta rakennusten energiankulutukseen kuin lämpötilalla ja auringon kokonaissäteilyllä (kuva 5.11), otetaan tulevaisuuden testivuosien laadinnassa huomioon näiden kaikkien ilmastosuureiden arvioitu muuttuminen ilmakehän kasvihuoneilmiön voimistumisen myötä.

7.2.1 Ilman lämpötila

Mallitulosten mukaan keskilämpötilat kohoavat tulevaisuudessa, mutta samalla lämpötilan vaihtelu päivästä toiseen vaimenee etenkin talvella. Jotta tämä tulisi otettua huomioon testivuoden TRY2030 laadinnassa, tulevaisuuden tunnittaiset lämpötilat (T_{ske}) laskettiin muokkaamalla nykyilmaston testivuoden tunnittaisia lämpötilahavaintoja:

$$T_{ske}(t) = T_{hav}(t) + \Delta\bar{T} + \left(\frac{\sigma_{T,ske}}{\sigma_{T,nyk}} - 1 \right) (T_{hav}(t) - \bar{T}_{hav}) \quad (7.1)$$

missä t on aika tunteina, T_{hav} havaintoihin perustuva lämpötila uuden testivuoden TRY2012 aikana, $\Delta\bar{T}$ ilmastomallien ennustama keskilämpötilan nousu tarkasteltavana kalenterikuukautena, $\sigma_{T,nyk}$ ja $\sigma_{T,ske}$ mallien simuloima vuorokauden keskilämpötilojen keskihajonta kunakin kuukautena perusjakson (1980–2009) ja tulevan jakson aikana (2015–2044), ja \bar{T}_{hav} on kunkin kuukauden keskilämpötila testivuoden TRY2012 säähavaintoaineistosta laskettuna.

Kaavasta (7.1) nähdään, että jos keskihajonta ei muutu ($\sigma_{T,nyk} = \sigma_{T,ske}$; likipitään tällainen tilanne vallitsee kesällä), kaikkia lämpötiloja nostetaan yhtä paljon, $\Delta\bar{T}$:n verran. Muina vuodenaikoina, jolloin hajonta ilmastomallien perusteella pienenee ($\sigma_{T,ske} < \sigma_{T,nyk}$), kylmiä lämpötiloja korotetaan enemmän kuin leutoja. Käytetty menetelmä on sopusoinnussa vuorokauden ylimpien ja alimpien lämpötilojen muutoksia koskevien aiempien arvioiden kanssa (esim. Räisänen et al., 2004; Jylhä et al., 2009).

Lämpötilan kuukausikeskiarvojen nousu $\Delta\bar{T}$ vertailujaksosta 1980–2009 vuotta 2030 ympäröivään 30-vuotisjaksoon mennessä saatiin 19 mallin tulosten keskiarvona (liite 9). Vuorokauden keskilämpötilojen vaihtelevuuden tarkasteluun oli käytettävissä 10 mallin tulokset kahdelle jaksolle, 1971–2000 ja 2081–2100. Keskihajontojen muutokset vuoteen 2030 mennessä arvioitiin interpoloimalla näiden kahden jakson välistä muutosta lineaarisesti ajan suhteen (liite 10).

7.2.2 Auringon säteily

Auringon kokonaissäteilyn tulevia muutoksia koskevia mallitietoja oli käytettävissä 18 mallista (liite 9). Niistä ei kuitenkaan käynyt ilmi, miten muutos jakautuu suoran ja hajasäteilyn osuuteen. Sen takia tarkasteltiin aluksi Sodankylässä, Jyväskylässä ja Vantaalla vuosina 1980–2009 tehtyjä säteilymittauksia (yhteensä yli 260 tuhatta mittauservoa). Osoittautui, että varsinkin matalilla auringon korkeuskulmilla näiden kolmen säteilysuureen välillä vallitsee varsin selväpiirteinen riippuvuus (liite 10). Kokonaissäteilyn ollessa vähäistä lähes kaikki auringon säteily saadaan hajasäteilynä. Kokonaissäteilyn kasvaessa hajasäteilyn osuus kuitenkin pienenee ja kokonaissäteilyn lisäys lankeaa yhä enenevässä määrin suorana säteilynä. Tätä havaintoihin perustuvaa riippuvuutta käytettiin hyväksi arvioitaessa suoran ja hajasäteilyn määriä tulevaisuuden ilmastossa. Pääperiaatteena oli, että jos nykyisen ilmaston testivuoden

havainnossa on suoraa säteilyä, kokonaissäteilyn muutos vaikutti ensisijaisesti siihen ja vasta toissijaisesti hajasäteilyyn. Menetelmän tarkempi kuvaus on nähtävissä liitteessä 10.

7.2.3 Suhteellinen kosteus

Samoin kuin ilman lämpötilalle ja auringon kokonaissäteilylle, myös suhteellisen kosteuden kuukausikeskiarvoille oli käytettävissä ilmastomallien simuloima jatkuva aikasarja vuoteen 2099 asti. Suhteellisen kosteuden muutoksista oli kuitenkin tarjolla mallilaskelmia vain seitsemästä mallista (liite 9). Nämäkin kosteusarvot eivät tarkkaan ottaen kuvaa aivan maanpinnan kanssa kosketuksissa olevaa ilmaa, vaan tasoa, jolla ilmanpaine on 1000 hPa. Alava- maastoissa Suomessa tämä painepinta on kuitenkin melko lähellä maanpintaa.

Lämpötilan ollessa alle 0°C suhteelliset kosteudet on havaintoaineistossa esitetty alijäähtyneen veden suhteen. Tämä tarkoittaa, että jos esimerkiksi 20 asteen pakkasella ilma on jään suhteen kyllästettyä, virallisen säähavainto-ohjeen mukainen suhteellinen kosteus onkin vain hiukan yli 80%. Merkittävästi jään suhteen laskettua kyllästystilaa suurempia kosteuksia ei maan pinnan lähellä voi esiintyä. Myös tulevaa ilmastoa kuvaavat kosteudet esitetään kaikissa lämpötiloissa nestemäisen veden suhteen.

Malleissa suhteelliset kosteudet on sitä vastoin esitetty jään suhteen. Lisäksi mallien nykyiselle ilmastolle simuloimat kosteudet poikkeavat muutoinkin jonkin verran havaituista. Siksi ei ole tarkoituksenmukaista lisätä mallien ennustamaa suhteellisen kosteuden muutosta suoraan sellaisenaan havaintoarvoihin. Koska varsinkin syksyllä ja talvella suhteellinen kosteus on Suomessa keskimäärin varsin korkea, on perusteltua ensin katsoa, kuinka ilman kyllästysvaja (havaitun kosteuden ja kyllästystilan välinen erotus) muuttuu ilmaston lämmetessä. Suhteelliset kosteudet lämmentäessä ilmastossa laskettiin tämän mukaisesti kahdessa vaiheessa: 1) lasketaan, paljonko kuukauden keskimääräistä suhteellista kosteutta pitää muuttaa, jotta se kuvaisi uutta lämmennettyä ilmastoa; 2) määrätään uudet tunnitaiset suhteellisen kosteuden arvot. Tarkoitukseen käytetyn iterointialgoritmin yksityiskohdat on esitetty liitteessä 10.

7.2.4 Tuulen nopeus ja suunta

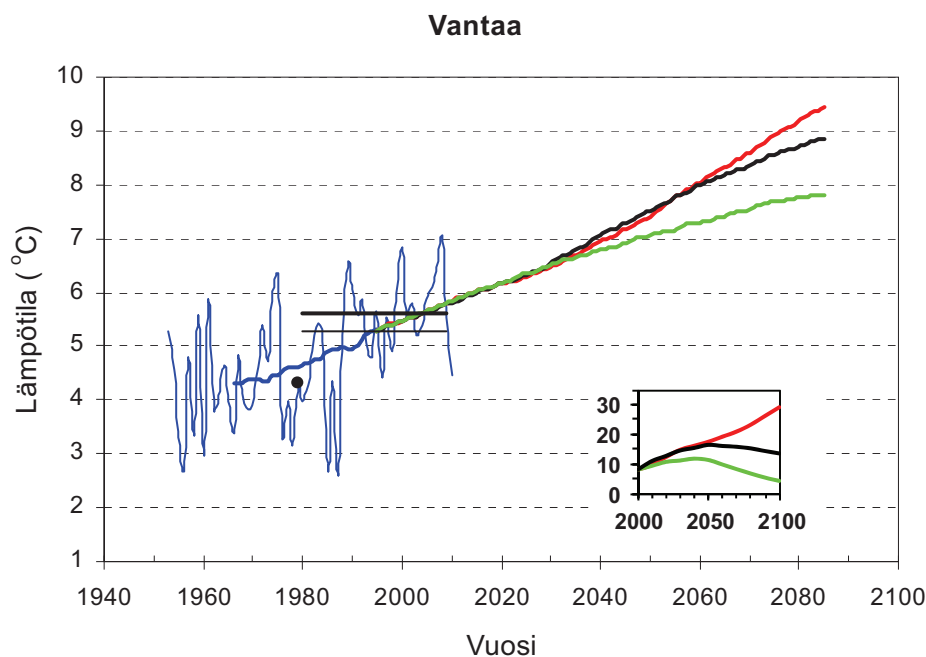
Tuulisuureiden muutoksia koskevat arviot perustuvat 9 mallin tuloksiin (liite 9). Näissä malliajoissa pakotteena oli käytetty A1B-kasvihuonekaasuskenaariota, mutta mallien ennustamat muutokset skaalattiin simuloitujen maapallon keskilämpötilojen muutosten perusteella vastamaan A2-skenaariota (Ruosteenojan et al. (2007) käyttämä menetelmä yksinkertaistettuna).

Laskettaessa muuttuneen ilmaston tuulia hetkellinen havaintoihin perustuva tuulivektori esitettiin aluksi komponenttimuodossa, erikseen itä-länsisuunnan ja pohjois-eteläsuunnan osuuk-sina. Näihin lisättiin mallien ennustama muutos kyseisessä komponentissa. Lopuksi saatuja arvoja korjattiin skalaarisen tuulen nopeuden muutosta kuvaavalla kertoimella. Siten menetelmä muuntaa kuukauden keskimääräisen tuulennopeuden täsmälleen kuten mallit ennustavat ja suuntien jakaumankin ainakin kvalitatiivisesti järkevästi. Menetelmään liittyvät kaavat ovat nähtävissä liitteessä 10.

8 Ilmastonmuutoksen arvioitu vaikutus energialaskennan sääsuureisiin

8.1 Ilmaston keskimääräiset muutokset

Vuoden keskilämpötilan arvioidaan kohoavan vuosisadan alkupuolella noin 0,3–0,4 astetta vuosikymmenessä, Sodankylässä hieman nopeammin kuin Jyväskylässä ja Vantaalla. Kuva 8.1 esittää 19 ilmastonmallin keskiarvona saatu arviota siitä, miten vuoden keskilämpötila (30 vuoden liukuvana keskiarvona) kohoaa Vantaalla tämän vuosisadan aikana; vastaava havaintoihin perustuva tasoitettu käyrä viime vuosisadalle ja yksittäisten menneiden vuosien havaintoarvot ovat myös nähtävillä kuvassa 8.1. Samanlaiset kuvat Jyväskylälle ja Sodankylälle on esitetty liitteen 11 kuvassa L11.1. Nähdään, että vielä lähivuosikymmeninä eri kasvihuonekaasuskenaarioihin perustuvat arviot ilmaston muuttumisesta ovat lähellä toisiaan. Eniten epävarmuutta vuosisadan alkupuolen ilmastoskenaarioihin aiheuttaa ilmaston luontainen vaihtelu, jota mallituloksiinkin sisältyy. Tässä raportissa tulevaisuuden energialaskelmat ajoitetaan vuoteen 2030 (luku 10). Tätä ajankohtaa ympäröivää 30-vuotiskautta tarkasteltaessa ilmastonmuutoksen signaali ei välttämättä vielä erotu kovin hyvin ilmaston luonnollisen vaihtelun aiheuttamasta hälystä. Useille ilmastosuureille pitkän ajan trendi tulee tilastollisesti merkitsevänä esille vasta vuosisadan loppupuolella. Tämän takia tarkastelemme ensin ilmaston arvioituja trendejä vuosisadan loppuun asti ja vasta sen jälkeen keskitymme testivuoteen 2030.

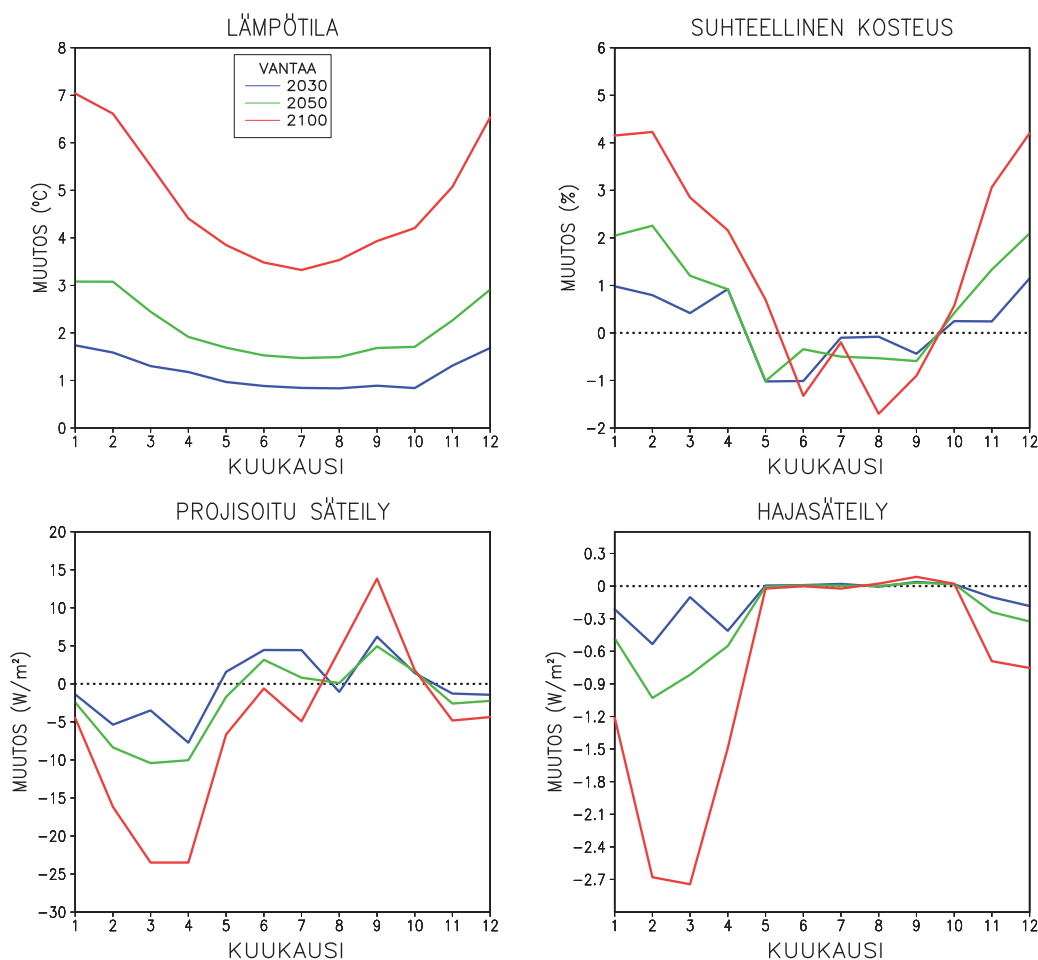


Kuva 8.1 Vuoden keskilämpötila Vantaalla v. 1953–2085. Vuosien 1953–2010 havaintoihin perustuvia yksittäisten vuosien arvoja esittää ohut sininen käyrä. Havaintoihin sovitettu 30 vuoden liukuva keskiarvo on näytetty paksulla sinisellä käyrällä. Tämän käyrän etenemiselle tulevaisuudessa on esitetty kolme vaihtoehtoista skenaariota, jotka perustuvat 19 ilmastomallin tulosten keskiarvoina saatuihin lämpötilojen muutoksiin havaintoasemaa lähinnä olevassa laskentahilapisteessä. Käytetyt kolme kasvihuonekaasuskenaariota ovat ns. SRES A2 (punainen), A1B (musta) ja B1 (vihreä). Kutakin skenaariota vastaavat hiilidioksidin päästöt (yksikkönä GtC/v) on esitetty oikean alareunan pikkukuvassa. Mustat janat jakson 1980–2009 kohdalla esittävät tämän jakson keskiarvoa (ohut viiva) sekä uuden testivuoden TRY2012 mukaista keskiarvoa (paksu viiva). Musta piste esittää vanhan testivuoden 1979 mukaista keskilämpötilaa.

8.1.1 Pitkän aikavälin trendit

Mikäli kasvihuonekaasujen ja pienhiukkasten tulevat pitoisuudet seuraavat A2-skenaariota, mallien keskiarvona saadun parhaan arvion mukaan vuotuinen keskilämpötila nousee vuoteen 2030 tultaessa runsaalla asteella, vuoteen 2050 yli kaksi astetta ja vuoteen 2100 viitisen astetta (liitteen 11 taulukko L11.1). Lämpeneminen on voimakkainta pohjoisessa. Eniten lämpötila kohoaa joulu–helmikuussa, kun taas keskikesällä lämpötilan nousu jää alle puoleen talvikuukausien lukemista (kuva 8.2).

Kaavassa (7.1) käytetty vuorokauden keskilämpötilojen keskihajonta ei mallitulosten mukaan juurikaan muutu touko–elokuussa. Muina kuukausina lämpötilat vaihtelevat tulevaisuudessa nykyistä vähemmän. Marras–maaliskuussa keskihajonta putoaa vuoteen 2100 tultaessa 22–36 % nykyisestä (liitteen 11 kuva L11.2).



Kuva 8.2 Lämpötilan, suhteellisen kosteuden, auringon sädettä vastaan kohtisuoralle pinnalle projisoitun suoraa säteilyä ja hajasäteilyä muutosten kuukausikeskiarvot Vantaalla siirryttäessä testivuodesta TRY2012 vuoteen 2030 (sininen käyrä), 2050 (vihreä käyrä) ja 2100 (punainen käyrä). Huomattakoon eri asteikko suoraa ja hajasäteilyä esittämissä kuvissa.

Kesää ja alkusyksyä lukuun ottamatta ilmastomallit ennustavat auringon kokonaissäteilyä vähenevän ilmaston muuttuessa (kuva L11.3). Vähennys painottunee suoraa säteilyä määrään hajasäteilyä muuttuessa vähemmän. Sädettä vastaan kohtisuoralle pinnalle projisoitua suoraa säteilyä vähenee pimeimpänä vuodenaikana useita kymmeniä prosentteja. Sodankylässä tammikuussa suora säteily loppuisi vuosisadan puoliväliin mennessä kokonaan; joulukuun kaamoksessa suoraa säteilyä ei ollut tarjolla ensinkään edes testivuoden TRY2012 aikana.

Kesällä muutokset ovat pieniä, ja alkusyksyt muuttuvat etelässä jopa hieman nykyistä valoisammiksi. Hajasäteilyn määrä putoaa talvisinkin enimmillään parinkymmenen prosentin verran, ja touko-syyskuussa muutos on olematon.

Talvella säteilyä kuitenkin saadaan hyvin vähän, joten isoiltakaan näyttävät prosenttimuutokset eivät ole absoluuttisesti suuria (kuvat 8.2 ja L11.4–L11.5). Energiayksiköissä laskettuna säteily väheneekin eniten kevättalven ja kevään aikana. Koko vuoden yhteenlasketusta projisoidusta suorasta säteilystä häviäisi vuoteen 2100 tultaessa etelässä noin 5% ja pohjoisessa vähän yli 10% (taulukko L11.1). Hajasäteily vähenisi alle kahdella prosentilla.

Suhteellinen kosteus on sadan vuoden kuluttua talvisin arviolta 4–8 prosenttia nykyistä korkeampi (kuvat 8.2 ja L11.4–L11.5). Muutos on suurin pohjoisessa. Kesällä muutokset ovat pieniä, ja varsinkin etelässä kosteus saattaa jopa hieman pudota.

Keskimääräinen tuulen nopeus kasvaa marras-helmikuussa muutaman prosentin, tammi-kuussa enimmillään noin kymmenen prosenttia. Samalla lounaan ja lännenpuoleiset tuulet yleistyvät. Keväällä ja kesällä tuuliolot muuttuvat varsin vähän.

Mallien ennustama ilmastonmuutos riippuu siis huomattavasti vuodenaajasta. Kesällä tilanne on melko yksinkertainen: lämpötila nousee 3–4 astetta sadassa vuodessa, eikä muissa ilmastomuuttujissa ole odotettavissa suuria muutoksia. Talvella taas tapahtuu paljon enemmän. Keskilämpötila nousee enemmän kuin kesällä, lämpötilojen vaihtelut vaimenevat, ilman suhteellinen kosteus lisääntyy muutamalla prosenttiyksiköllä ja auringon säteilyä saadaan vähemmän. Myös sademäärä kasvaa huomattavasti ja pilvisuus lisääntyy (ei kuvaa). Syksyllä ja talvella myös lännenpuoleiset tuulet näyttävät yleistyvän ja tuulen nopeuskin kasvaa hieman.

Kaikissa niissä tapauksissa, joissa muutossignaali on merkittävä, muutos etenee ajan suhteen monotonisesti, ts. muutos on pienin v. 2030 ja suurin v. 2100. Muutoksen pitkän aikavälin trendi on nouseva siinäkin tapauksessa, että kasvihuonekaasujen ja pienhiukkasten tulevat pitoisuudet eivät seuraakaan A2-skenaariota, kuten tässä raportissa on oletettu. Mikäli päästömäärät saadaan käännettyä laskuun tai niiden kasvua edes hillittyä, ei vuoden 2100 ilmastonmuutos olisi alkuunkaan niin voimakas kuin mitä tässä raportissa on otaksuttu. Vuosien 2030 ja 2050 tilanteeseen päästörajoitukset eivät juuri ehdi vaikuttaa (kuva 8.1).

Tulevaisuuden päästöjen lisäksi toisen suuren epävarmuuden lähteen ilmastoa ennustettaessa muodostavat käytetyt ilmastomallit. Mallit ovat kyllä varsin yksimielisiä ilmastosuureiden muutosten suunnasta. Sen sijaan muutoksen suuruus vaihtelee kovasti mallista toiseen. Esimerkiksi A2-skenaariota mukainen lämpötilan nousun vaihteluväli malleissa on vuosisadan loppuvuosikymmeninä talvella 5–10 °C ja kesällä 1–6 °C (mallituloksista laskettu 90 % epävarmuusväli; <http://ilmatieteenlaitos.fi/acclim/>). Vastaavasti auringon säteilyn kokonaismäärän ennustetaan talvella vähentyvän Etelä-Suomessa noin nollasta reiluun 30 prosenttiin.

8.1.2 Muutokset testivuodelle 2030

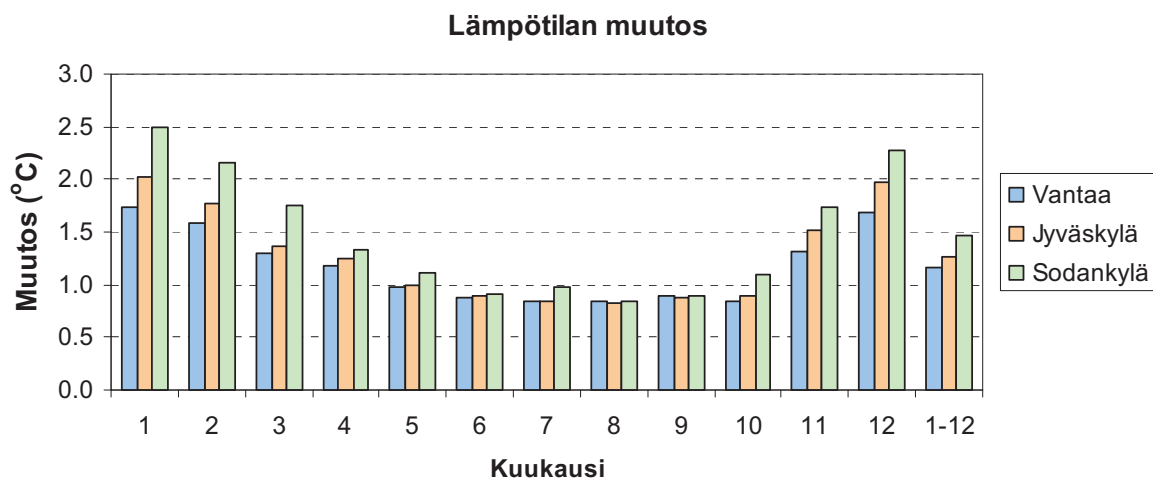
Sääsuureiden arvioidut keskimääräiset muutokset vuoteen 2030 tultaessa on esitetty kuvissa 8.3–8.7. Vuoden 2030 keskilämpötila on ilmastomallien mukaisen parhaan arvion perusteella paikasta riippuen 1,2–1,5 astetta korkeampi kuin nykyistä ilmastoa kuvaavana uutena testivuonna (kuva 8.3). Talvella keskilämpötila nousee noin kaksi astetta, kesällä vajaan asteen. Lämpötilan vaihtelevuus loka–marraskuun ja maaliskuu–huhtikuun välisenä aikana vähenee noin 10 % nykyisestä (kuva 8.4). Tulokset ovat sopusoinnussa pitkän aikavälin trendien kanssa (kuvat 8.2 ja L10.1). Ilmaston luonnollisesta vaihtelusta ja mallien eroavaisuuksista aiheutuva lämpenemisen epävarmuushaarukka on Jylhän et al. (2009) tuloksista päätellen kuitenkin varsin leveä, eri vuodenaajoille noin asteen ja koko vuodellekin yli puoli astetta molempiin suuntiin. On joka tapauksessa todennäköistä, joskaan ei aivan varmaa, että kymmenvuotisjakson

2021–2030 keskilämpötila ylittää tuossa tutkimuksessa käytetyn vertailujakson 1971–2000 vastaavan arvon, ja sama pätee luonnollisesti myös jaksolle 2031–2040.

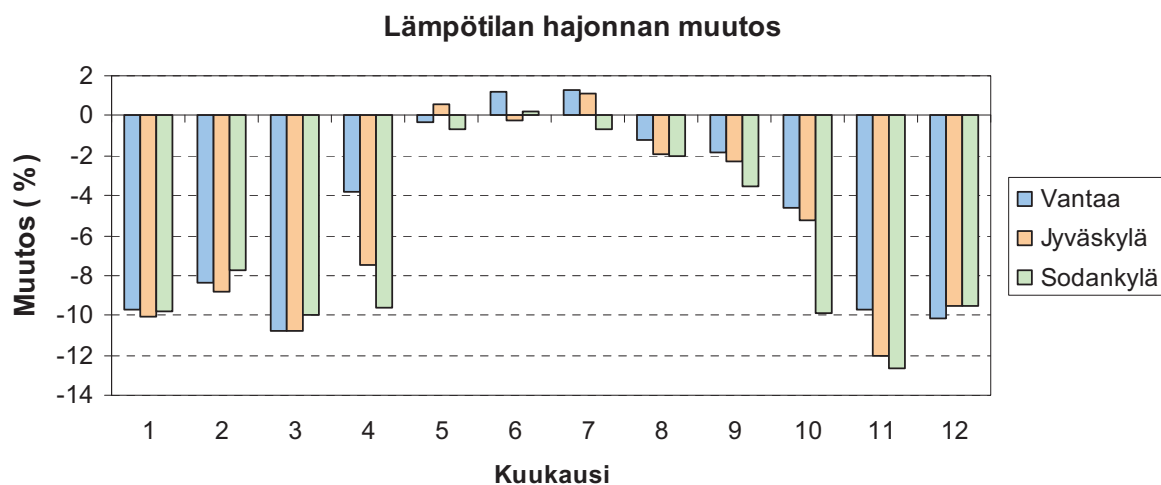
Maalis-huhtikuussa auringonsäteilyn vaikutus rakennusten energiantarpeeseen on noin neljännes ulkoilman lämpötilan vaikutuksesta (kuva 5.11). Tähän aikaan vuodesta auringon kokonaissäteily vaakapinnalle ja sädettä vastaan projisoitu kohtisuora suora säteily ovat vuoden 2030 ilmastossa hieman nykyistä pienempiä (kuva 8.5). Sen sijaan kesällä, jolloin auringonsäteily vaikuttaa energiantarpeeseen suunnilleen yhtä paljon kuin lämpötila (kuva 5.11), suoran säteilyn määrä saattaisi aavistuksen kasvaa, mutta mahdollinen pieni lisäys on selvästi epävarmempaa kuin lämpötilan kohoaminen, eikä hajasäteily muutu käytännössä lainkaan.

Ilmastonmuutosarviot osoittavat kaikille kolmelle paikkakunnalle pientä suhteellisen kosteuden kasvua lokakuusta huhtikuuhun vuodelle 2030 (kuva 8.6) ja myös pidemmälle tulevaisuuteen (kuvat 8.2 ja L11.4–L11.5). Toukokuussa ilma näyttäisi hieman kuivuvan kaikilla kolmella asemalla, mutta tätä ei voi pitää luotettavana signaalina, sillä muutoksen etumerkki muuttuu ajan mukana. Joka tapauksessa sen vaikutus rakennusten energiankulutukseen jäisi olemattomaksi.

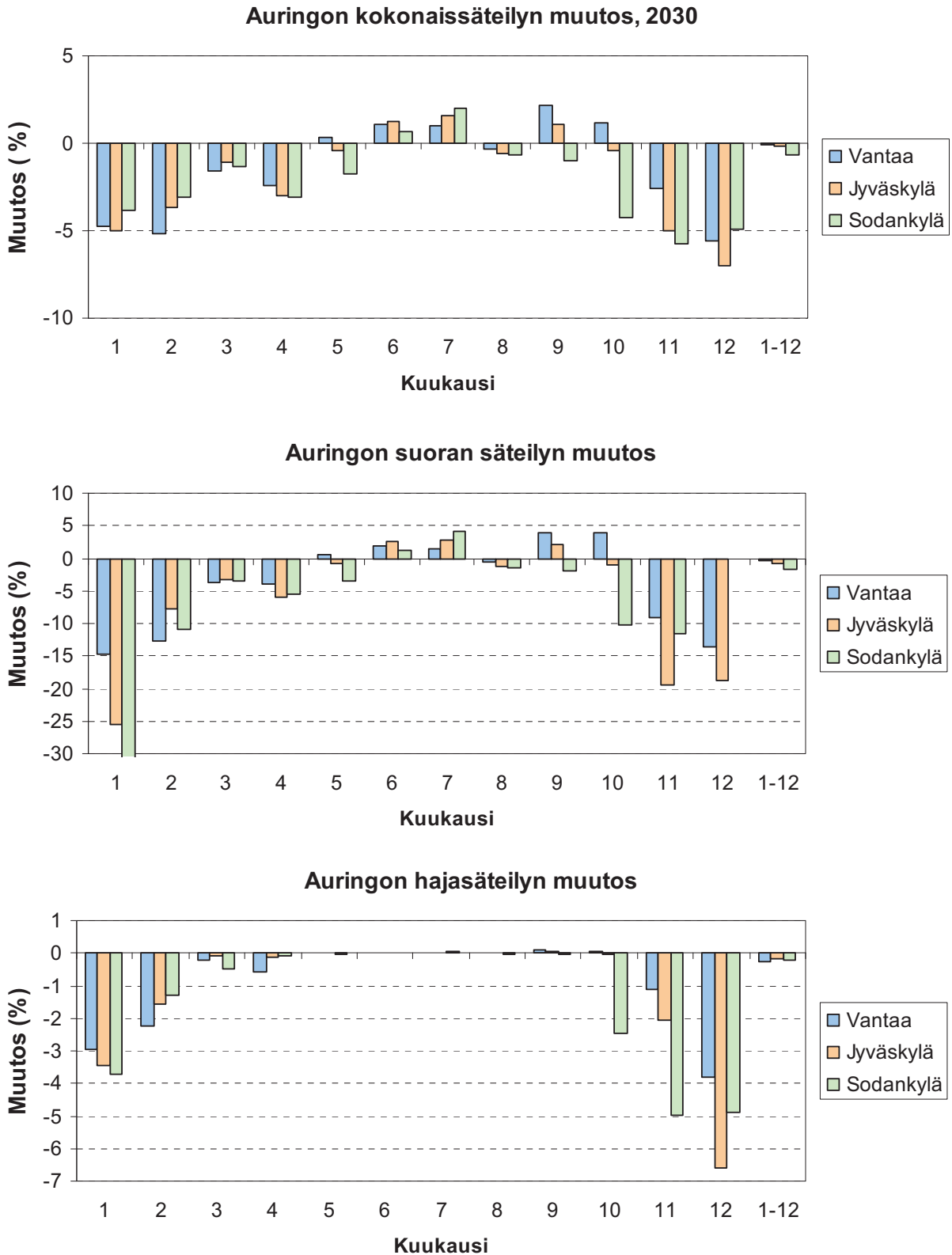
Tuuli voimistuu vain vähän, enimmillään 1–2,5% muutoksen ajoittuessa marras–helmikuuhun (kuva 8.7).



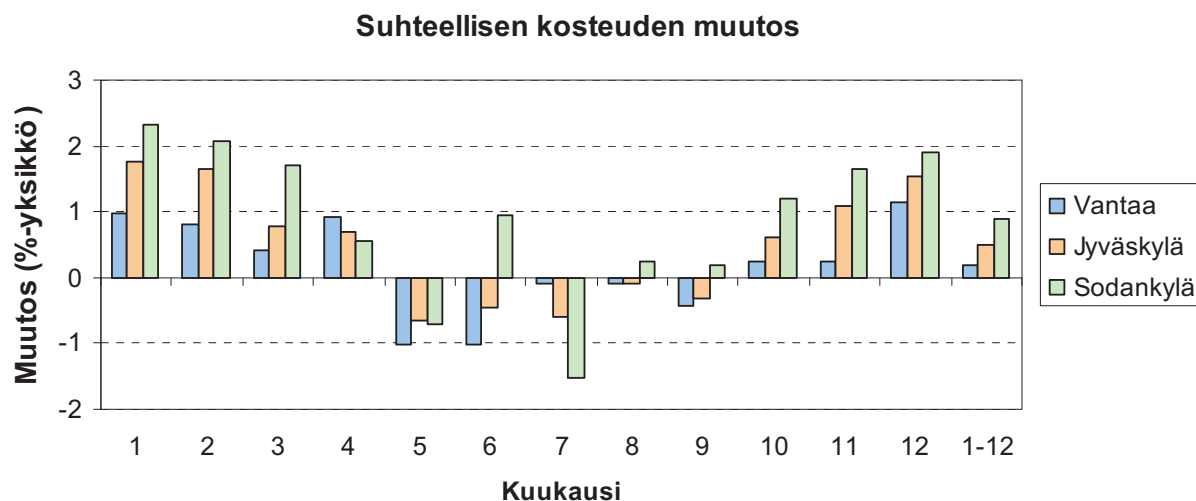
Kuva 8.3 Ilman lämpötilan muutosten kuukausikeskiarvot kalenterikuukausittain Vantaalla, Jyväskylässä ja Sodankylässä siirryttäessä uudesta testivuodesta vuoteen 2030. Vuoden keskilämpötilan muutos esitetään viimeisillä pylväillä ”1–12”.



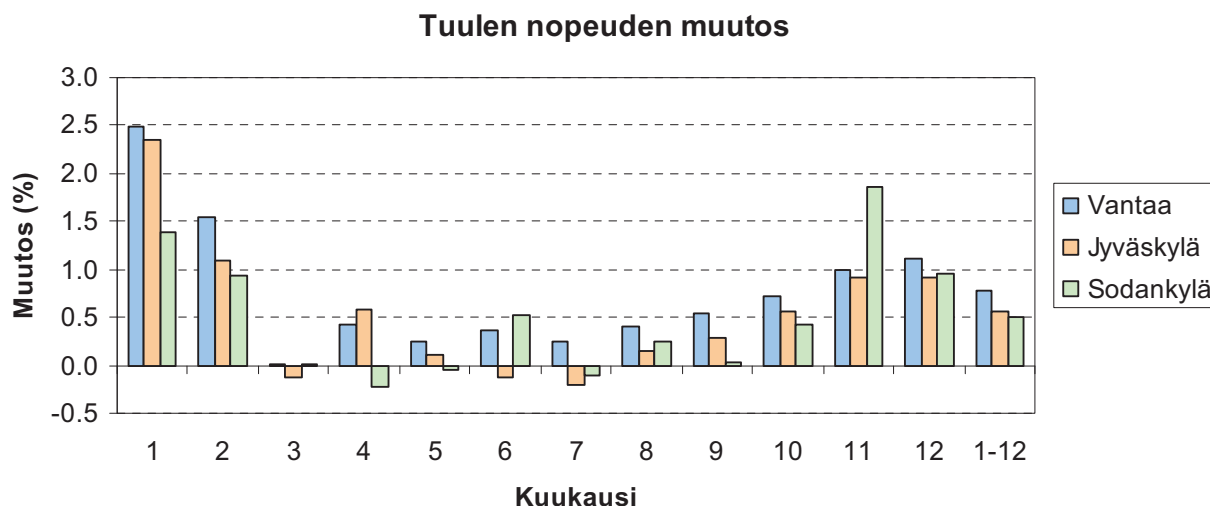
Kuva 8.4 Vuorokauden keskilämpötilan keskihajonnan suhteellinen muutos kalenterikuukausittain Vantaalla, Jyväskylässä ja Sodankylässä siirryttäessä uudesta testivuodesta vuoteen 2030.



Kuva 8.5 Vaakapinnalle saapuvan auringon kokonaissäteilyn (ylhäällä), sädettä vastaan koh-tisuoralle pinnalle projisoidun suoran säteilyn (keskellä) ja vaakapinnalle saapuvan hajasäteilyn (alhaalla) suhteellinen muutos kalenterikuukausittain Vantaalla, Jyväskylässä ja Sodankylässä siirryttäessä uudesta testivuodesta vuoteen 2030. Tammikuussa Sodankylässä projisoidun suoran säteilyn muutos on asteikkoa suurempi (-77% keskiku-vassa). Vuotuisen säteilymäärän muutos esitetään viimeisillä pylväillä ”1–12”.



Kuva 8.6 Suhteellisen kosteuden muutos kalenterikuukausittain Vantaalla, Jyväskylässä ja Sodankylässä siirryttäessä uudesta testivuodesta vuoteen 2030. Muutosten vuosikeskiarvo esitetään viimeisillä pylväillä ”1–12”.



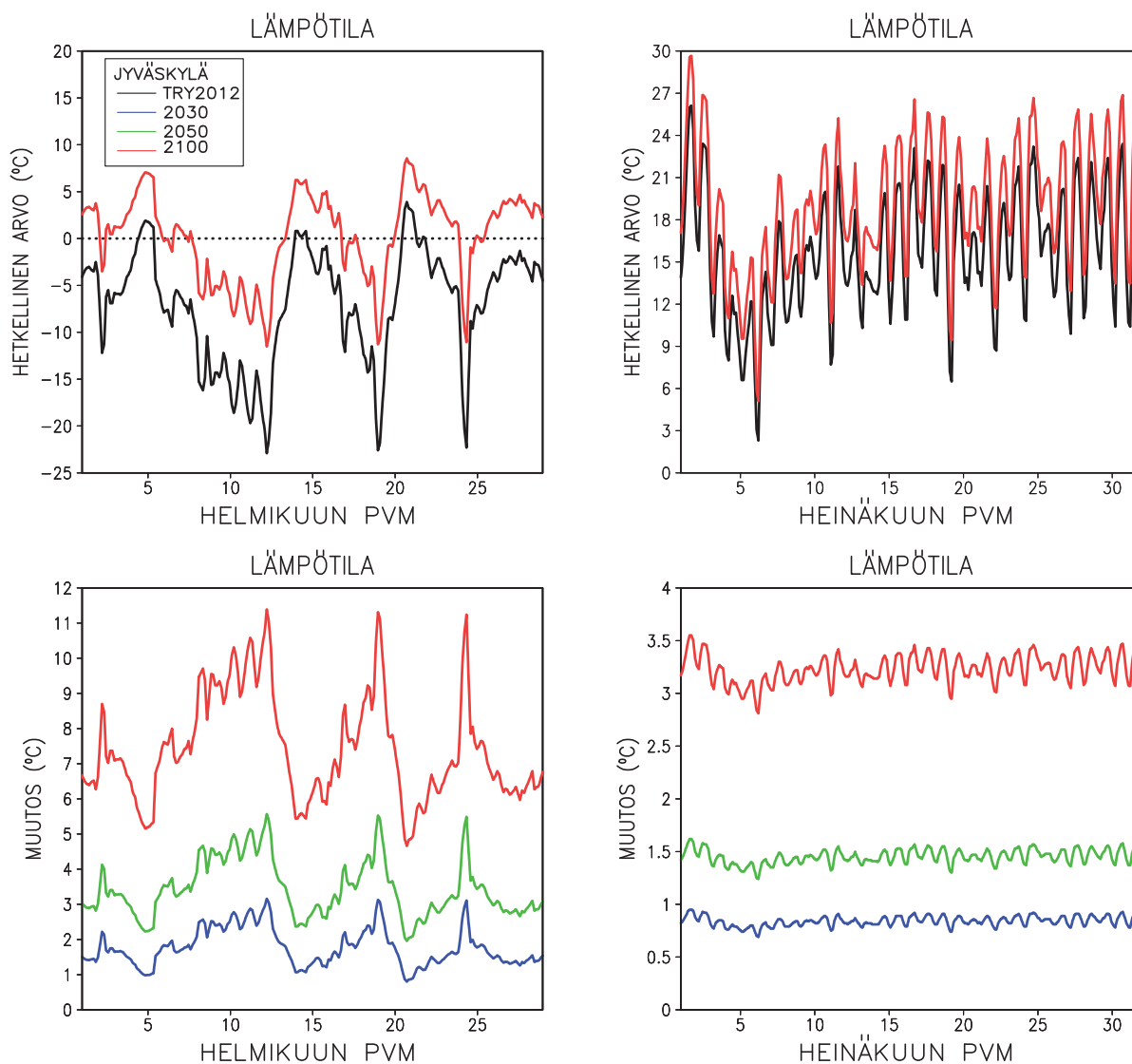
Kuva 8.7 Tuulen nopeuden suhteellinen muutos kalenterikuukausittain Vantaalla, Jyväskylässä ja Sodankylässä siirryttäessä testivuodesta vuoteen 2030. Tuulen vuosikeskiarvon suhteellinen muutos esitetään viimeisillä pylväillä ”1–12”.

8.2 Lämpötilan hetkellisten arvojen muutokset

Havaintoihin pohjautuvien tunnin välein esitettyjen säätietojen muuntamista tulevaan ilmaan on havainnollistettu Jyväskylän lämpötiloille kuvassa 8.8. Luettavuuden helpottamiseksi tuloksia on esitetty vain kahdelle äärivuodenaikakuukaudelle, helmi- ja heinäkuulle.

Lämpötila nousee heinäkuussa kaikkina ajanhetkinä varsin tasaisesti, vuoteen 2100 tultaessa vähän yli kolmella asteella. Tämä on sopusoinnissa kuvan 8.4 kanssa, jossa todettiin lämpötilojen vaihtelevuuden säilyvän keskikesällä jokseenkin entisen suuruisena. Talvella lämpötilaa taas on nostettu kaikkein kovimmilla pakkasilla noin kaksi kertaa niin paljon kuin sään ollessa leudoimmillaan. Tämä luonnollisesti liittyy lämpötilan vaihteluitten pienentymiseen talvella. Kaikkein lauhimpina talvipäivinäkin lämpötilan nousu on kuitenkin selvästi suurempaa kuin kesällä milloinkaan.

Muiden ilmastosuureiden hetkellisten arvojen muutoksia tarkastellaan liitteessä 11.



Kuva 8.8 Yläkuvat: tunnitaiset lämpötilat Jyväskylässä helmikuussa (vasen) ja heinäkuussa (oikea) testivuoden TRY2012 aikana (musta käyrä) sekä laskettuina vuodelle 2100 (punainen käyrä). Alakuvat: tunnitaisien lämpötilojen muutokset Jyväskylässä siirryttäessä testi- vuodesta vuoteen 2030 (sininen käyrä), 2050 (vihreä käyrä) ja 2100 (punainen käyrä).

Talvella kylmimpien lämpötilojen ennustetaan siis kohoavan enemmän kuin lauhimpien. Tällä on merkitystä mitoittavien lämpötilojen kannalta. Toisaalta on huomattava, että niitä ei määritetä tulevaisuudessakaan tavanomaisten kuukausien, kuten testivuosien TRY2030, TRY2050 ja TRY2100 talvikuukausien kylmimpien päivien perusteella. Sen sijaan tarkasteltavina ovat vuosikymmenien pituisten jaksojen kireimpiin kuuluvat pakkaset (luku 3). Yksittäisten pakkaskausien esiintyminen on aika satunnaista, mitä ilmentävät vuosien 1987 ja 1999 tammikuiden huippupakkaset. Niiden vuoksi vuoden toiseksi alimman kahden vuorokauden keskilämpötilan aikasarjan kylmimmät arvot viimeisen kuuden vuosikymmenen aikana ovat vyöhykkeestä riippuen peräti 1–7 astetta alempia kuin nykyiset mitoituslämpötilat (taulukko 3.2), vaikka talvien keskilämpötila onkin selvästi kohonnut tuona aikana (luku 1.2). Yksittäisiä kovia pakkasjaksoja koetaan vielä tulevaisuudessakin, mikä on hyvä ottaa huomioon nyt kiinteistöjä rakennettaessa. Niinpä mitoituslämpötiloja lienee syytä leudontaa merkittävästi vasta pitkällä tähtäimellä.

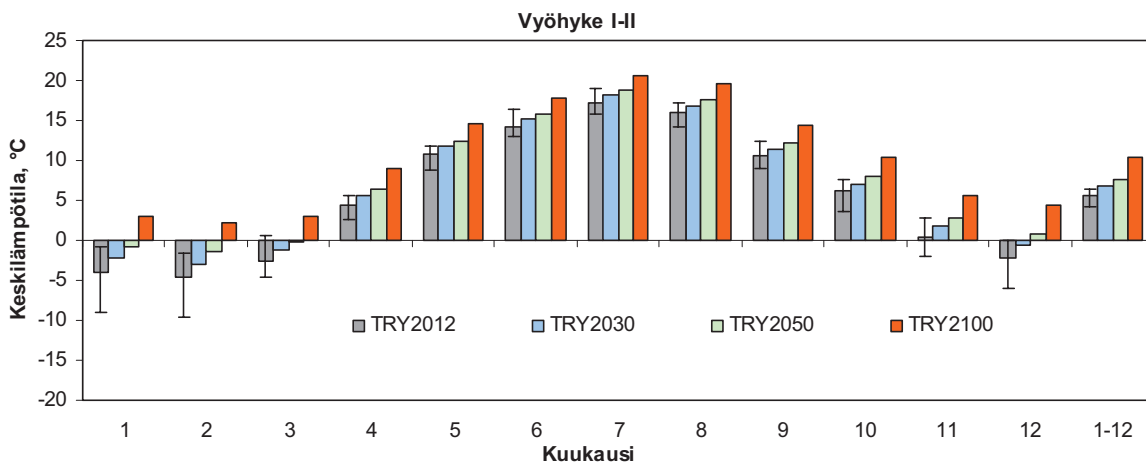
9 Tulevaisuuden testivuodet

Nykyistä ilmastoa koskevan testivuoden TRY2012 säätietoja muokkaamalla saatiin tuotettua hetkellistä sääaineistoa tunnin välein vuodelle 2030 ja samalla myös vuosille 2050 ja 2100. Sääaineisto soveltuu rakennusten energiankulutuksen ennakkointiin tulevaisuudessa olettaen, että eri ilmastosuureiden keskinäinen tärkeysjärjestys pysyy kutakuinkin ennallaan ilmastomuutoksesta huolimatta. Toisin sanoen testivuotta TRY2012 valittaessa käytetyt lämpötilan ja auringon säteilyn painokertoimet energialaskennassa (luku 5.2.2) pidetään ennallaan, jolloin tulevaisuuden testivuosien pohjana voidaan käyttää nykyisen ilmaston testivuotta. Oletusta tukee se, että auringon säteilyn ennustetut muutokset ovat verrattain vähäisiä touko-elokuussa (luku 8), jolloin sen vaikutus energiantarpeeseen on samaa suuruusluokkaa kuin lämpötilan. Myös tuulen nopeus ja ilman kosteus muuttuvat vain vähän, joten niiden vaikutus energialaskentaan säilyy edelleen pienenä.

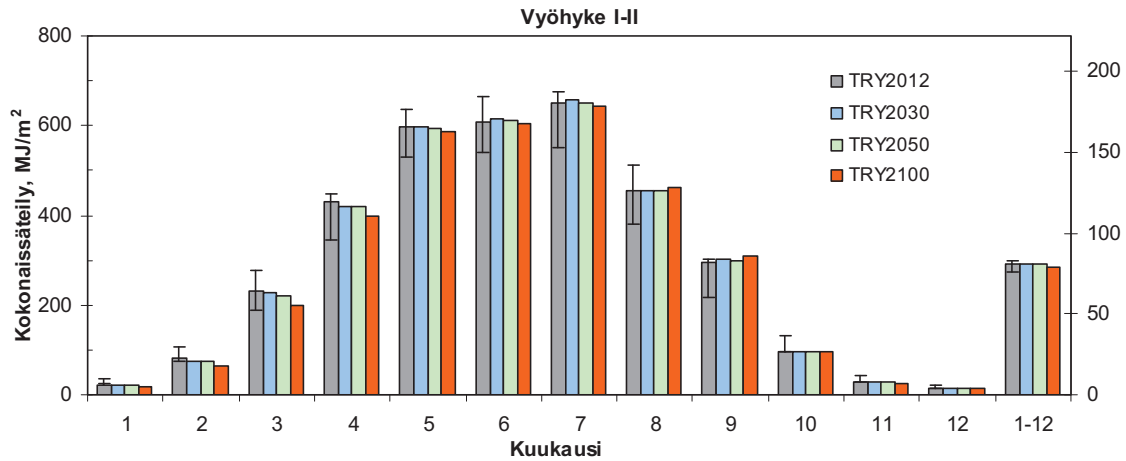
Tulevaisuuden testivuosien keinotekoisia aikasarjoja ei luonnollisestikaan pidä tulkita ennusteina juuri kyseisille ajanhetkille. Yksittäisten simuloitujen arvojen sijasta tulee tarkastella aineiston tilastollisia ominaisuuksia. Lisäksi on muistettava, että testivuoden 2030 säätietoihin aiheuttaa epävarmuutta ilmaston luonnollinen vaihtelu vuosikymmenestä ja myös 30-vuotiskaudesta toiseen. Testivuosiin 2050 ja 2100 vaikuttaa myös oletettu varsin suurten päästöjen kasvihuonekaasuskenaario A2. Pienempien päästöjen toteutuessa ilmasto muuttuisi vastaavasti vähemmän. Eri ilmastomallien eroista aiheutuvaa epävarmuushaarukkaa ei ole otettu tässä tutkimuksessa huomioon, vaan tulevaisuuden testivuodet perustuvat useiden mallien (liite 9) tulosten keskiarvona saatuun ns. parhaaseen arvioon.

9.1 Keskimääräinen ilmasto

Tulevaisuuden testivuosien mukaiset kuukausikeskilämpötilat on esitetty vyöhykkeille I–II kuvassa 9.1 ja vyöhykkeille III ja IV liitteessä 12. Lämpötilojen kohoaminen on nähtävissä jo testivuoteen 2030 mentäessä. Vaikka lämpeneminen on asteina voimakkainta talvella, se on vuosina 1980–2009 havaittuun kuukausikeskilämpötilojen vaihtelevuuteen nähden selvintä kevätkuukausien ja koko vuoden keskilämpötilaa tarkasteltaessa. Vuosisadan puolivälin testivuosi TRY2050 ja varsinkin sen lopun testivuosi TRY2100 ovat kuukausikeskilämpötiloiltaan jo huomattavasti nykyisen ilmaston testivuotta TRY2012 lämpimämpiä.



Kuva 9.1. Kuukauden keskilämpötilat Vantaalla (vyöhykkeet I–II) uutena testivuotena (TRY2012) sekä tulevaisuuden testivuosina 2030, 2050 ja 2100. Pystyjanat näyttävät \pm keskihajonnan suuruisen poikkeaman jakson 1980–2009 keskimääräisistä kuukausikeskilämpötiloista (katso kuva 6.2). Vuoden keskilämpötila esitetään viimeisillä pylväillä ”1–12”.



Kuva 9.2. Auringon kokonaissäteilyn määrä vaakatasolle kalenterikuukausittain Vantaalla (vyöhykkeet I–II) uutena testivuotena (TRY2012) sekä tulevaisuuden testivuosina 2030, 2050 ja 2100. Pystyjanat näyttävät \pm keskihajonnan suuruisen poikkeaman jakson 1980–2009 havaintojen mukaisesta kuukausikeskiarvosta (katso kuva 6.4). Kalenterikuukausien keskimääräinen säteilysumma esitetään viimeisillä pylväillä ”1–12”. Oikeanpuoleisella pystyakselilla yksikkönä on kWh (1 kWh = 3,6 MJ).

Auringon kokonaissäteilyenergian kuukausisummat vaakatasolle on esitetty vyöhykkeille I–II kuvassa 9.2 ja vyöhykkeille III ja IV liitteessä 12. Säteilyn keväinen väheneminen erottuu hieman paremmin kuin muiden kuukausien hyvin pienet muutokset.

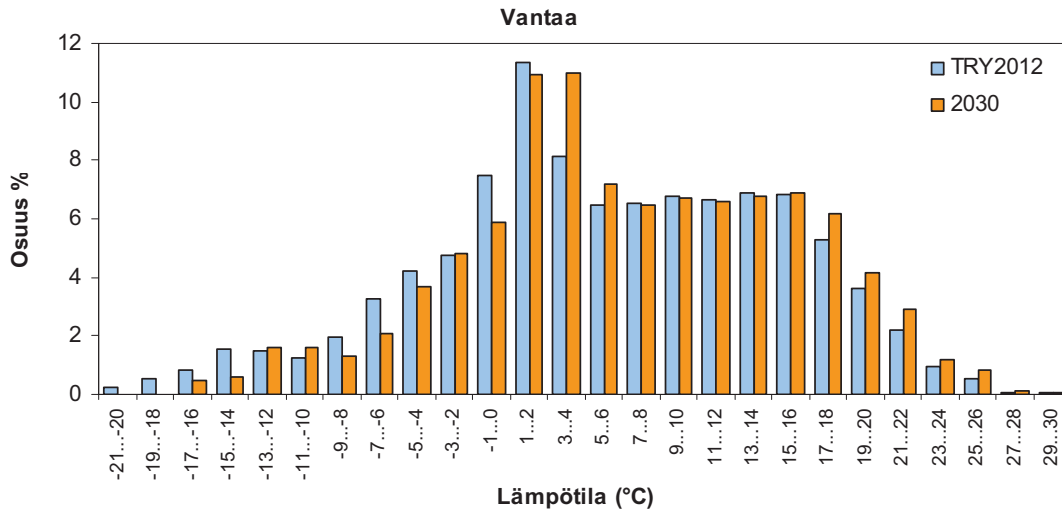
9.2 Ilmastosuureiden frekvenssijakaumia

Lämpötilojen kohotessa ja niiden vaihtelevuuden vähetessä etenkin talvella lämpötilan frekvenssijakaumat siirtyvät odotetusti oikealle, kuten nähdään vertaamalla testivuosien TRY2012 ja TRY2030 jakaumia (kuva 9.3 ja liite 12). Ankarimmat pakkaset siis leudontuvat huomattavasti, mutta huippuhelteet eivät tukaloitu samassa suhteessa. Testivuoden TRY2100 Jyväskylän aineistossa alin lämpötila on yli 13, vuoden korkein lämpötila vain vajaa kolme astetta korkeampi kuin TRY2012:n aineistossa (liitteen 12 kuva L12.7).

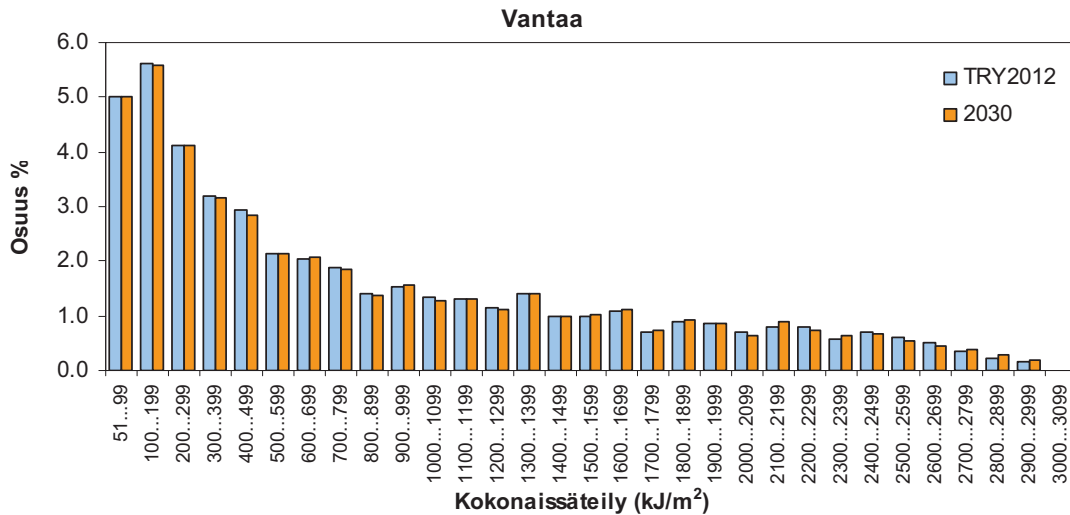
Havaintojen mukaan nolla-asteen lähellä olevia lämpötiloja esiintyy jonkin verran yleisemmin kuin useita asteita suojan tai pakkasen puolella olevia (kuvan 9.3 siniset pylväät). Fysikaalisen intuition perusteella voitaisiin odottaa jonkinmoista frekvenssihuippua nolla-asteen vaiheille myös tulevaisuuden ilmastossa. Kaavaa (7.1) sovellettaessa tämä huippu kuitenkin siirtyy lämpöasteiden puolelle (kuvan 9.3 oranssit pylväät). Suurin ongelma lämpötiloja kaavan (7.1) avulla muunnettaessa liittyykin juuri nolla-asteen lähellä oleviin lämpötiloihin.

Auringon säteilyä kertyy tunnin aikana yleisimmin joko ei lainkaan tai enintään 50 kJ m⁻². Vantaalla tällaisten tilanteiden osuus on 54 %, Jyväskylässä vajaan ja Sodankylässä runsaan prosentin suurempi. Auringon kokonaissäteilyenergian frekvenssijakaumat nykyisen ja vuoden 2010 ilmaston testivuosien aineistoissa säteilymäärän ollessa tätä rajaa suurempi on esitetty kuvissa 9.4 ja L12.5–L12.6. Jakaumien muutokset ovat hyvin vähäisiä.

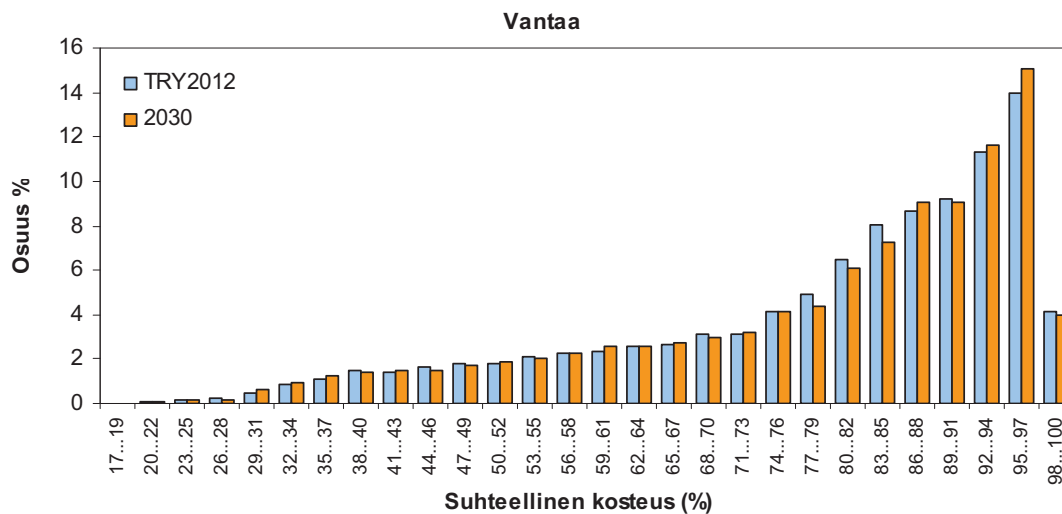
Suhteellisten kosteuksien suurimmat, 90 % ylittävät arvot yleistyvät selvästi talvisin pienempien lukemien kustannuksella, kun taas kesällä muutokset ovat pieniä (kuva L12.7). Muutoksen voi nähdä myös testivuotta 2030 koskevilla koko vuoden jakaumissa (kuvat 9.5, L12.5–L12.6).



Kuva 9.3. Lämpötilan prosentteina ilmaistu suhteellinen frekvenssijakauma Vantaalla (vyöhykkeet I–II) uuden testivuoden (TRY2012) tuntiaineistosta laskettuna ja vastaavasti vuonna 2030. Asteikon arvot ovat pyöristettyjä, joten esim. 1...2 °C tarkoittaa väliä 0,5...2,4 °C.



Kuva 9.4. Sama kuin kuva 9.3, mutta auringon tunnittaiselle kokonaissäteilyenergialle, kun se on ollut vähintään 51 kJ m⁻². Kaikkein yleisimmän eli 54 prosenttia ajasta tunnin aikana vaakapinnalle kertyneen säteilyn määrä on ollut nolla tai enintään 50 kJ m⁻².



Kuva 9.5. Sama kuin kuva 9.3, mutta ilman suhteelliselle kosteudelle.

Koska tuulen suunnan ja nopeuden muutokset vuoteen 2030 mennessä ovat hyvin pieniä, niiden frekvenssijakaumia tarkastellaan testivuoden 2100 aineistojen perusteella. Tuolloinkin muutokset ovat vähäisiä. Talvisin kohtalaiset ja kovat tuulet voimistuvat hieman (Gregow et al., 2011), ja samalla etelän ja lännen puoleiset tuulet yleistyvät pohjois-, itä ja kaakkoistuulien kustannuksella. Tämä näkyy myös koko vuoden jakaumissa (kuva L12.8). Kesällä tuulet puhaltavat tulevaisuudessa suunnilleen yhtä kovaa ja samoilta suunnilta kuin nykyisinkin.

10 Energialaskelmat testivuosilla 2012 ja 2030

Rakennusten energialaskelmat uuden sekä luvussa 9 esitetyn tulevaisuuden testivuoden sääaineistoilla tehtiin IDA-ICE 4.0 simulointiohjelmalla Vantaalla, Jyväskylässä ja Sodankylässä sijaitseville yksikerroksisille pientaloille (kuva 5.4) sekä viisikerroksisille toimistorakennuksille (kuva 5.5).

Esimerkkirakennusten lämmityksen ja jäähdytyksen ostoenergiankulutusta vertailtiin testivuosilla TRY2012 ja TRY2030. Ostoenergia sisältää rakennuksen tilojen, ilmanvaihdon sekä käyttöveden lämmitykseen käytettävän sähkön (pientalo) tai kaukolämmön (toimisto) kulutuksen sekä jäähdytyksen, valaistuksen ja laitteiden (huoneiden laitteet sekä puhaltimet ja pumput) sähkönkulutuksen. Todettakoon, että rakennuksen tilojen lämmitysenergian nettotarpeella tarkoitetaan sitä energiamäärää, jonka lämmityslaitteen pitää siirtää tilaan, jotta sisälämpötila pysyy asetusarvossaan. Lämmityslaitteen ostoenergian tarve on hieman suurempi kuin em. lämmitystarve, koska lämmityslaitteessa on jonkin verran häviöitä ja esimerkiksi energiaa kuluttavia säätölaitteita.

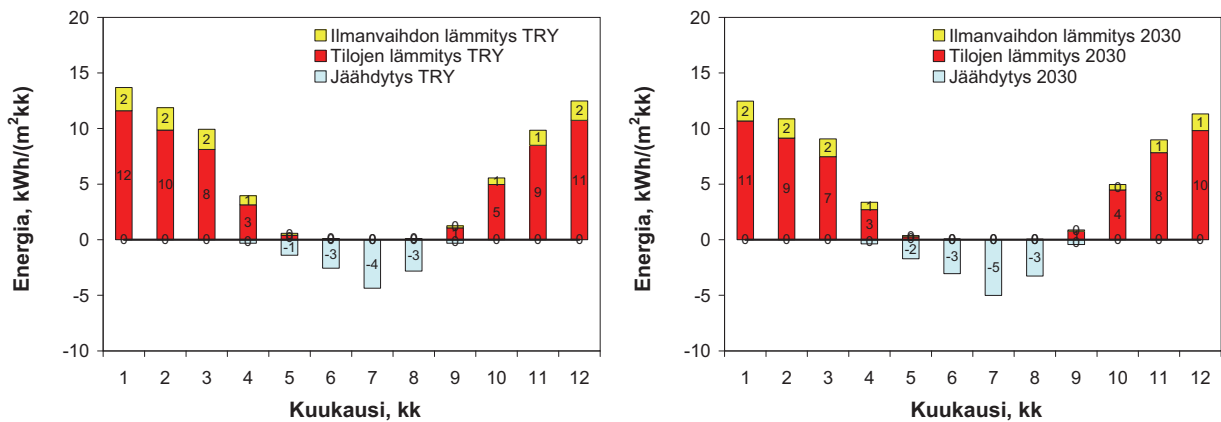
Pientalo

Yksikerroksisen pientalon ostoenergiakulutuksen jakautuminen eri tarkoituksiin energialaskennan uuden testivuoden TRY2012 ja tulevaisuuden (vuosi 2030) testivuoden sääaineistojen perusteella on esitetty taulukossa 10.1 kullekin kolmelle paikkakunnalle. Kuvassa 10.1 on lisäksi esitetty Vantaalla sijaitsevan pientalon kuukausittaiset lämmitys- ja jäähdytysenergian nettotarpeet molempien testivuosien säätietojen avulla laskettuina.

Taulukko 10.1. Pientalon (huoneistoala 133 m²) ostoenergiakulutuksen erittely uuden testivuoden (TRY2012) ja tulevaisuuden testivuoden (2030) säätiedoista laskettuna. Yksikkö on kWh/(m²·a).

Ostoenergiakulutus	Vantaa		Jyväskylä		Sodankylä	
	TRY2012	2030	TRY2012	2030	TRY2012	2030
Tilojen lämmitys	60	55	70	64	92	84
Tilojen jäähdytys sähkö	3	3	2	3	2	2
Ilmanvaihdon lämmitys	11	9	14	12	20	18
Puhaltimet	7	7	7	7	7	7
Kotitaloussähkö	25	25	25	25	25	25
Valaistus	7	7	7	7	7	7
Lämmin käyttövesi	36	36	36	36	36	36
Ostoenergia yht.	149	142	161	153	188	178

Tulokset osoittavat, että pientalon kokonaisostosenergiakulutus tulee pieneneään ilmastonmuutoksen vaikutuksesta noin 5 % vuoteen 2030 mennessä, mikäli oletettu ilmastonmuutosskenaario toteutuu. Tällöin tilojen ja ilmanvaihdon lämmityksen ostoenergiakulutus vähenee paikkakunnasta riippuen noin 10 % (7–10 kWh/m²·a) ja jäähdytyksen ostoenergiakulutus kasvaa vastaavasti 17–19 % (0,3–0,5 kWh/m²). Koska jäähdytyksen osuus talon yhteenlasketusta ostoenergiakulutuksesta on vain 2 %, sen muutoksella ei ole merkittävää vaikutusta talon kokonaissähkökulutukseen. Jäähdytyslaitteiden tehontarve tulee kuitenkin kasvamaan vuoteen 2030 mennessä keskimäärin 4 %.



Kuva 10.1. Vantaalla sijaitsevan pientalon lämmitys- (posit.) ja jäähdytysenergian nettotarve (negat.) uuden testivuoden (vasen) ja tulevaisuuden (v. 2030) testivuoden (oikea) säätietojen perusteella laskettuina.

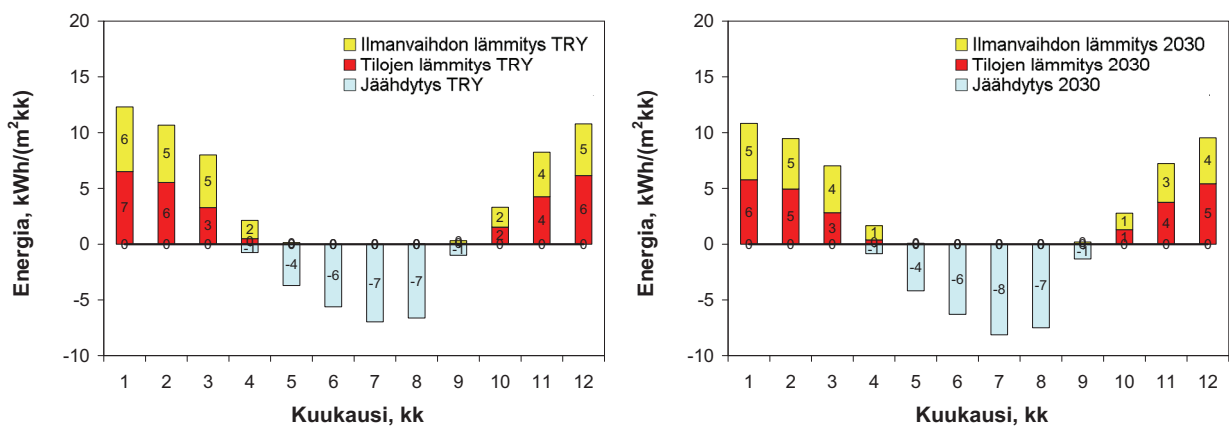
Toimistorakennus

Taulukossa 10.2 on esitetty toimistorakennuksen ostoenergiankulutuksen jakautuminen eri tarkoituksiin Vantaalla, Jyväskylässä ja Sodankylässä uuden ja tulevaisuuden (vuosi 2030) testivuoden sääaineistoilla laskettuna. Kuva 10.1 esittää Vantaalla sijaitsevan toimistorakennuksen kuukausittaiset lämmitys- ja jäähdytysenergian nettotarpeet energialaskennan molempien testivuosien säätietojen perusteella laskettuina.

Taulukko 10.2. Toimistorakennuksen (nettoala 6245 m²) ostoenergiankulutuksen erittely uuden testivuoden (TRY2012) ja tulevaisuuden testivuoden (2030) säätiedoista laskettuna. Yksikkö on kWh/(m²·a).

Ostoenergiankulutus	Vantaa		Jyväskylä		Sodankylä	
	TRY2012	2030	TRY2012	2030	TRY2012	2030
Tilojen lämmitys	28	25	34	30	50	44
Tilojen ja ilmanvaihdon jäähdytys-sähkö	6	7	5	6	4	4
Ilmanvaihdon lämmitys	28	24	35	30	51	44
Puhaltimet	15	15	15	15	15	15
Laitesähkö	24	24	24	24	24	24
Valaistus	29	29	29	29	29	29
Lämmin käyttövesi	14	14	14	14	14	14
Ostoenergia yht.	144	138	156	148	187	174

Tulosten mukaan toimistorakennuksen kokonaisostoenergiankulutus tulee pieneneään ilmastonmuutoksen vaikutuksesta 4–7 % vuoteen 2030 mennessä, mikäli oletettu ilmastonmuutoskenaario toteutuu. Tilojen ja ilmanvaihdon lämmityksen ostoenergiankulutuksen arvioidaan vähenevän paikkakunnasta riippuen 13 % (7–13 kWh/m²·a) ja jäähdytyksen ostoenergiankulutuksen kasvavan vastaavasti 13–15 % (0,5–0,9 kWh/m²·a). Koska jäähdytyksen osuus talon yhteenlasketusta ostoenergiankulutuksesta on vain 2–5 %, sen muutoksella ei ole merkittävää vaikutusta talon kokonaisostoenergiankulutukseen.



Kuva 10.2. Vantaalla sijaitsevan toimistorakennuksen lämmitys- (posit.) ja jäähdytysenergian nettotarpeet (negat.) laskettuna uuden testivuoden (TRY; vasen kaavio) ja tulevaisuuden testivuoden (2030; oikea kaavio) säätiedoista.

11 Testivuosiens tarkastelua niiden käytön kannalta

Tässä raportissa kuvatut uuden testivuoden (TRY2012) ja tulevaisuuden testivuosiens (TRY2030, TRY2050 ja TRY2100) sääaineistot vyöhykkeillä I–II, III ja IV ovat saatavissa hankkeen verkkosivustolta ilmatieteenlaitos.fi/rakennusten-energiälaskennan-testivuosi. Testivuosiens säätiedostojen rakenne on kuvattu taulukossa 11.1.

Taulukko 11.1. Testivuosiens sääaineistot sisältävien tiedostojen rakenne.

Sarake	Suure	Selityksiä
1	Aika-askel	Tunti "1" vastaa ajanhetkeä 1.1. klo 00:00 Suomen normaaliaikaa
2	Vuosi	TRY2012:ssa todellinen vuosi (eri kunakin kuukautena), muutoin 2030, 2050 tai 2100
3	Kuukausi	
4	Päivämäärä	Suomen normaaliajan mukaisesti
5	Kellonaika	Suomen normaaliajan mukaisesti
6	Ilman lämpötila	Yksikkö °C
7	Ilman suhteellinen kosteus	Yksikkö % (nestemäisen veden suhteen)
8	Tuulen suunta	Asteina, 0: tyyni, 90: idästä, 180: etelästä, 270: lännestä, 360: pohjoisesta
9	Tuulen nopeus	Yksikkö m/s
10	Suora säteily auringon sädettä vastaan kohtisuoralle pinnalle	Yksikkö W/m ²
11	Hajasäteily vaakapinnalle	Yksikkö W/m ²
12	Kokonaissäteily vaakapinnalle	Yksikkö W/m ²

11.1 Nykyisen ilmaston uusi testivuosi

Vanhan testivuoden 1979 käytöstä annetut ohjeet (Tammelin ja Erkiö, 1986) pätevät monin osin edelleen, ja niitä sovelletaan seuraavassa.

Suomen uusi nykyisen ilmaston testivuosi RTY2012 sekä tulevaisuuden testivuodet vuosien 2030, 2050 ja 2100 ilmastolle on muodostettu ensisijaisesti rakennusten energiankulutuslaskelmia sekä LVI-järjestelmien suunnittelua varten. Testivuosiens aineistojen avulla on mahdollista ottaa huomioon maan etelä-, keski- ja pohjoisosien ilmastojen erilaisuus. Tavoitteena on kuvata sääoloja olosuhteiltaan "tyypillisenä" vuotena, ei harvinaisia, saati poikkeuksellisia säätilanteita. Muodostetuilla aineistoilla ei pyritä vastaamaan mitä moninaisimpien muiden sovellutusalojen tarpeisiin. Eri sovelluksissa eri sääsuureiden keskinäinen tärkeysjärjestys vaihtelee, samoin kuin se, ovatko keskimääräiset vai äärevät säätilanteet merkityksellisempiä. Milloin ei ole mahdollista tai tarkoituksenmukaista hyödyntää kokonaisuudessaan pitkiä, vuosikymmenien pituisia säähavaintojen aikasarjoja, poimittavien havaintojen valintakriteerit tulee asettaa kunkin sovellutuksen tarpeiden mukaisesti.

Suomen uusi energialaskennan testivuosi koostettiin vuosien 1980–2009 aikana esiintyneistä kuukausista standardin EN ISO 15927-4 mukaisia valintakriteereitä muokaten. Muutamissa tapauksissa olisi ollut mahdollista päätyä johonkin muuhunkin kuukauteen kuin mikä lopulta valittiin. Vuoden sääaineisto olisi voitu koota myös kuukautta lyhyempien ajanjaksojen avulla, mutta tällöin olisi todennäköisesti esiintynyt entistä useammin sääsuureiden jyrkkiä muutoksia siirryttäessä jaksosta toiseen. Testivuotta TRY2012 laadittaessa ilmeni, että epäjatkuvuudet olivat suuria etenkin lämpötiloissa ja suhteellisissa kosteuksissa. Jotta testivuoteen valittujen kuukausien vaihteissa ei esiintyisi sääsuureiden porrasmaisia hyppäyksiä, kuukauden viimeisten ja ensimmäisten tuntien arvojen eroja on tarvittaessa tasoitettu.

Suomen ilmastolle on luonteenomaista voimakas vaihtelu kaikilla aikaskaaloilla tunneista vuosikymmeniin. Lisäksi taustalla vaikuttaa maailmanlaajuiseen ilmastomuutokseen liittyvä pitkän ajan trendi. On käytännössä mahdotonta löytää kuukausi, joka sääsuureesta toiseen täsmälleen noudattaisi 30 vuoden aineistosta laskettua keskimääräistä frekvenssijakaumaa. TRY2012:n kuukaudet on valittu ensisijaisesti lämpötilan ja auringon kokonaissäteilyn ja toissijaisesti ilman kosteuden ja tuulen nopeuden perusteella. TRY2012 asettuu useimmiten varsin lähelle pitkän ajan keskiarvoja ja kuvaa näin kullekin kuukaudelle ja vyöhykkeelle mahdollisimman ”tyypillistä” sääolojen vaihtelua.

Nykyään automaattisten havaintoasemien käyttöönoton myötä monia säämuuttujia mitataan hyvin taajaan, mutta koko 30-vuotisjaksolta 1980-2009 tunnittaisia havaintoja oli saatavissa vain säteilysuureista. Muutoin mittaukset oli tehty kolmen tunnin välien. Niinpä testivuoden TRY2012 sääaineisto sisältää huomattavan määrän interpoloituja arvoja (luku 5.4). Koska interpolointi tasoittaa havaintohetkien välistä vaihtelua, esitetyt tunnittaiset arvot voivat poiketa huomattavasti kyseisen hetken todellisista arvoista. Aineisto ei myöskään sisällä esimerkiksi vuorokauden minimi- ja maksimilämpötiloja, elleivät ne ole sattuneet juuri varsinaiselle havaintoajalle. Interpoloinnin takia eri suureiden yhdistelmät voivat havaintohetkien välisinä aikoina olla jossain määrin epärealistisia.

Testivuoden TRY2012 säätiedot eri havaintoasemilla ovat peräisin eri vuosilta. Niinpä esimerkiksi kesäkuun aineisto vyöhykkeille I–II on vuodelta 2005, vyöhykkeelle III vuodelta 1985 ja vyöhykkeelle IV vuodelta 1988 (luku 5.3). Tämän takia eri asemien päivittäisten vaihteluiden välillä ei ole meteorologisessa mielessä realistista yhteyttä. Sen sijaan testivuoden aineistot soveltuvat tilastolliseen vertailuun eri asemien kesken, joskin tällöinkin on pidettävä mielessä, että yksittäistä kuukautta tai vielä lyhyempää ajanjaksoa tarkasteltaessa jokin suure saattaa selvästikin poiketa keskimääräisestä (esimerkkeinä toukokuun korkeat säteilyarvot Jyväskylässä; kuva L6.2).

Tutkimuksessa käytetyt kolme havaintoasemaa on valittu suurilmastollisten olojen, käytännössä 30 vuoden keskilämpötilan (1980–2009) perusteella edustamaan neljää rakennusten energialaskennan vyöhykettä (luku 2). Lisäksi havaintoasemien valintaan on vaikuttanut eri säämuuttujien mittausten monipuolisuus ja saatavuus. Sovellettaessa tietoja muualle kuin kyseiselle havaintopaikalle on syytä pitää mielessä, että paikalliset olosuhteet, kuten maaston muodot, vesistöt ja maankäyttö vaikuttavat lämpötiloihin ja muihin energialaskennan sääsuureisiin. Testivuosi ei siis sovellu sen tarkasteluun, miten paikalliset tai pienilmastolliset tekijät vaikuttavat tietyllä paikalla sijaitsevan tai sinne suunnitellun rakennuksen energiankulutukseen. Sitä vastoin testivuoden sääaineistot kuvaavat pinta-alaltaan laajan maamme ilmasto-oloja maantieteellisessä mielessä suurpiirteisesti.

Kun hyödynnetään rakennusten energiantarvetta ja niiden sisäilmastoa päivästä toiseen simuloivia laskentaohjelmia sekä näiden tarvitsemia tunnittaisia testivuosiaineistoja, saadaan esille kaikkien säämuuttujien vaikutukset energiantarpeeseen. Tämä on etuna verrattuna siihen, että käytettäisiin pelkästään lämpötilasta riippuvia lämmitys- ja jäähdytystarvelukuja (esim. Vajda et al., 2003; Venäläinen et al., 2004b; Pilli-Sihvola et al., 2010). Liitteessä 1 on esitetty vertailun vuoksi kuitenkin myös testivuosiaineistojen mukaiset lämmitystarveluvut (S17) Vantaalla, Jyväskylässä ja Sodankylässä.

Huomattakoon, että testivuosiaineistot eivät sovellu lämmitys- eikä jäähdytystehotarpeen laskentaan. Lämmitysjärjestelmien mitoittavat ulkoilman lämpötilat vyöhykkeille I-IV on annettu taulukossa 3.2 (sarake RakMk5 D5, 2007). Mitoituslämpötiloja ei ollut tarvetta muuttaa tämän tutkimuksen perusteella, joskin vyöhykejaon tarkennus johtaa mitoituslämpötilan alenemiseen seitsemässä Kainuun ja Pohjois-Pohjanmaan kunnassa (luku 3). Jos Keski-Pohjanmaa olisi siirretty vyöhykkeestä II vyöhykkeeseen III, näin olisi käynyt myös siellä.

11.2 Tulevaisuuden ilmaston testivuodet

Tulevaisuutta kuvaavat energialaskennan testivuodet muodostettiin nykyistä ilmastoa koskevan testivuoden TRY2012 säätietojen pohjalta. Niitä muokattiin ottaen huomioon arviot odotettavissa olevasta ilmastonmuutoksesta Suomessa. Tulevaisuuden testivuotta käytettäessä oletetaan implisiittisesti, että eri meteorologisten suureiden keskinäinen tärkeysjärjestys energialaskennan kannalta säilyy ilmastonmuutoksesta huolimatta nykyisen kaltaisena.

Tulevaisuuden testivuotia koskevat samat huomautukset kuin testivuotta TRY2012, minkä lisäksi on pidettävä mielessä, että tulevaa ilmastoa ja sen muuttumisen nopeutta koskevat ennusteet ovat pakostakin epävarmoja (esim. Jylhä et al., 2009). Ensinnäkään kasvihuonekaasujen tulevia päästöjä ja pitoisuuksia ei tiedetä tarkasti, ja toiseksi eri ilmastomallit antavat erilaisia arvioita siitä, kuinka voimakkaasti ilmakehän koostumuksen muutokset vaikuttavat ilmastoon. Lisäksi ilmasto vaihtelee myös luonnostaan vuodesta ja vuosikymmenestä toiseen. Nämä kaikki epävarmuustekijät tulisi ottaa huomioon, kun tutkitaan ilmastonmuutosten vaikutuksia rakennusten energiantarpeeseen.

Aineistoon liittyy siis seuraavia oleellisia epävarmuustekijöitä:

- Testivuotien laadinnassa ei ole otettu huomioon työn pohjana olleiden 7–19 ilmastomallien eroista aiheutuvaa epävarmuushaarukkaa. Sen sijaan on oletettu, että nämä mallit osaisivat keskimäärin kuvata ilmaston muutosta harhattomasti. Tällä edellytyksellä saadaan mallitulosten keskiarvoina parhaat arviot siitä, miten ilmastosuureiden 30-vuotiskausjaksojen keskiarvot muuttuvat perusjaksosta 1980–2009 tuleviin 30-vuotiskausjaksoihin mentäessä, jos käytetty kasvihuonekaasuskenaario toteutuu.
- Testivuoden 2030 säätietoihin aiheuttaa epävarmuutta ennen kaikkea ilmaston luonnollinen vaihtelu vuosikymmenestä ja myös 30-vuotiskaudesta toiseen. Testivuosiin 2050 ja 2100 vaikuttaa myös oletettu varsin suurien päästöjen kasvihuonekaasuskenaario (ns. A2-skenaario). Pienempien päästöjen toteutuessa ilmastokin muuttuisi vähemmän.
- Tulevaisuuden testivuotien keinotekoisia säätietoja ei luonnollisestikaan tule tulkita ennusteina juuri kyseiselle vuodelle, päivälle tai tunnille. Yksittäisten simuloitujen arvojen sijasta tulee tarkastella aineiston tilastollisia ominaisuuksia.

Tulevaisuuden testivuotien laatimiseksi jouduttiin ns. delta-menetelmää räätälöimään, jotta ilmastonmuutos voitiin kuvata sen mukaisena kuin mallit sen ennustavat, mutta samalla saatiin säilytettyä säätilojen vaihtelu ajanhetkestä toiseen kvalitatiivisesti nykyisen kaltaisena. Eri sääsuureiden tunnitaiset arvot muokattiin tulevaisuutta varten muiden suureiden muutoksista riippumatta, mistä saattaa aiheutua jonkin verran epävarmuutta. Delta-menetelmän muokkaamisen vaihtoehtona harkittiin tutkimuksen alkuvaiheessa myös ns. säägeneraattorin käyttämistä, mutta sillä ei olisi saatu simuloitua kaikkia tarvittavia suureita. Lisäksi ilmeni, että kesäaikaisten lämpötilojen ja auringonsäteilyn määrien välinen korrelaatio nykyisessä ilmastossa olisi jäänyt säägeneraattorin simulointitulosten mukaan paljon pienemmäksi kuin havaintojen perusteella. On siis syytä pitää mielessä, että tulevaisuuden testivuotien sääaineistot ovat suuntaa antavia pikemminkin kuin täsmällisiä. Kuitenkin tämä aineisto on tällä hetkellä käytössä olevan tietämyksen mukaan parasta mahdollista, mitä rakennusten energialaskentaan voidaan tarjota.

12 Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa kehitettiin rakennusten energiankulutuksen laskentaa varten uudet testivuodet säätieläineen sekä nykyisessä että arvioidun mukaisessa tulevaisuuden ilmastossa. Nykyisen ilmaston uusi testivuosi TRY2012 laadittiin Suomen rakennusten energialaskennassa käytettäville ilmastovyöhykkeille vuosien 1980–2009 säähavaintojen perusteella. Testivuosi TRY2012 tulee käyttöön uusien rakentamismääräysten astuessa voimaan 1.7.2012. Tulevaisuutta kuvaavat energialaskennan testivuodet muodostettiin muokkaamalla testivuoden TRY2012 säätielätoja siten, että ne ovat sopusoinnussa mallikokeiden mukaisten ilmastomuutosarvioiden kanssa.

Rakennusten energiankulutuksen laskenta on tähän asti perustunut Ilmatieteen laitoksen säähavaintoasemien mittauksiin Vantaalla Helsinki-Vantaan lentoasemalla (vyöhyke I), Jokioisten observatoriossa (vyöhyke II), Jyväskylän lentoasemalla (vyöhyke III) ja Lapin ilmatieteellisessä tutkimuskeskuksessa (vyöhyke IV). Myös lämmitysjärjestelmien mitoituksessa on käytetty näitä samoja vyöhykkeitä. Hankkeen tulosten pohjalta tähän tehtiin seuraavat muutokset ja täsmennykset:

- Koska ero kahden eteläisimmän vyöhykkeen (I ja II) vuosikeskilämpötilojen välillä on pieni ja vyöhykkeen I osuus Suomen rakennuskannan kerrosalasta on suurempi kuin vyöhykkeen II, käytetään vastedes molemmilla vyöhykkeille samaa Vantaan säähavaintojen perusteella laadittua energialaskennan testivuosiaineistoa.
- Vaikka vyöhykkeillä I–II onkin jatkossa yhteinen energialaskennan sääaineisto, rakennusten lämmitysjärjestelmien mitoitukseseen käytetään edelleen kummallekin vyöhykkeelle erikseen määriteltyjä ulkoilman mitoituslämpötiloja. Hankkeessa selvitettiin, tulisiko nykyisten rakentamismääräysten (RakMk D5, 2007) mukaisia mitoittavia lämpötiloja nostaa jo toteutuneen ilmaston lämpenemisen vuoksi, mutta tähän ei toistaiseksi ilmennyt tarvetta. Yksittäisiä kovia pakkasjaksoja nähtäneen vielä ainakin lähivuosikymmeninä, joten mitoituslämpötiloja lienee syytä leudontaa merkittävästi vasta pitkällä tähtäimellä.
- Koska vyöhykkeillä I–II sijaitsee $\frac{3}{4}$ koko Suomen rakennuskannasta, TRY2012:n kolmesta aineistosta soveltuvat Vantaan säähavainnot parhaiten käytettäväiksi, kun tarkoituksena on osoittaa rakennuksen energiatehokkuuden määräysten mukaisuus.
- Myös vyöhykkeille III ja IV muodostettiin uudet energialaskennan sääaineistot. Vyöhykkeiden välistä rajaa muutettiin aiempaan energialaskennan ja mitoituslämpötilan vyöhykejakoon verrattuna siten, että kylmimpään vyöhykkeeseen IV kuuluvat Lapin maakunnan lisäksi nyt myös Pohjois-Pohjanmaan itäosa ja Kainuun pohjoisosa (Ristijärvi, Hyrynsalmi, Puolanka, Suomussalmi, Pudasjärvi, Taivalkoski ja Kuusamo).

Suomen uusi energialaskennan testivuosi TRY2012 koostettiin vuosien 1980–2009 aikana esiintyneistä kuukausista. Jotta testivuoden sääaineistot kuvaisivat mahdollisimman hyvin keskimääräisiä sääoloja, testivuoden kuukaudet poimittiin eri vuosilta. Nämä testikuukaudet valittiin tutkimalla vuorokauden keskilämpötilan, auringon kokonaissäteilyn, suhteellisen kosteuden ja tuulen nopeuden frekvenssijakaumia eri kuukausina Vantaalla, Jyväskylässä ja Sodankylässä. Valintamenetelmä perustui SFS EN ISO 15927-4 -standardiin, jota kuitenkin muokattiin siten, että kuukausien valinnassa painotettiin niitä ilmastomuuttujia, joilla on suurin vaikutus rakennusten lämmitys- ja jäähdytystarpeeseen. Esimerkkirakennuksina käytettiin

tyypillistä suomalaista yksikerroksista uudispienaloja ja viisikerroksista toimistorakennusta. Näiden rakennusten energiantarvetta koskeneet herkkyysslaskelmat osoittivat seuraavaa:

- Ulkoilman lämpötilalla on ilmastomuuttujista suurin vaikutus rakennusten lämmitys- ja jäähdytysenergian tarpeeseen
- Kesällä auringon säteily vaikuttaa energiantarpeeseen suunnilleen saman verran kuin lämpötila
- Tuulen ja etenkin ulkoilman kosteuden vaikutus rakennusten energiantarpeeseen on selvästi pienempi kuin lämpötilan ja säteilyn.

Kun testikuukaudet oli valittu, niille muodostettiin tunnitaiset sääaineistot, joita verrattiin vanhan testivuoden 1979 säätietoihin sekä koko 30-vuotisjakson (1980–2009) keskiarvoihin. Vertailujen mukaan:

- Uuden testivuoden TRY2012 keskilämpötilat ovat kaikilla vyöhykkeillä lähellä pitkäaikaisia keskiarvoja (1980–2009) eron ollessa 0,2–0,5 °C lämpimään suuntaan. Myös testivuoden yksittäisten kuukausikeskilämpötilojen poikkeamat jäävät pieniksi vuosien väliseen vaihteluun verrattuna. Vuotuiset lämmitystarveluvut ovat testivuoden tiedoista laskettuina 1–2 % pitkäaikaisia keskiarvoja pienempiä.
- TRY2012 on vyöhykkeestä riippuen 0,7–1,3 °C lämpimämpi kuin vanha testivuosi 1979. Vuotuisten lämmitystarvelukujen suhteelliset erot ovat 4–11 %. Eniten uuden ja vanhan testivuoden lämpötilat eroavat toisistaan Etelä-Suomessa.
- Auringon kokonaissäteilyenergian määrä maaliskuu–lokakuussa on uutena testivuotena paikasta riippuen 4–6 % suurempi kuin vanhana testivuotena 1979 ja 1–4 % suurempi kuin keskimäärin vuosina 1980–2009. Joinakin yksittäisinä kuukausina testivuoden säteilysuureiden poikkeamat vertailuarvoista olivat selvästi tätä suurempia.
- Suhteellisen kosteuden arvot vuoden kesäpuoliskon muutamina kuukausina erosivat jonkin verran uuden ja vanhan testivuoden välillä, mutta kaiken kaikkiaan niiden ja tuulen nopeuksien erot testivuosien välillä olivat pieniä.

Nykyistä ilmastoa koskevan testivuoden TRY2012 säätietoja muokattiin tulevaisuuden tarkasteleluja varten ottamalla huomioon arviot ilmastomuutoksesta. Näin saatiin tuotettua hetkellistä keinotekoisia säätietoja tunnin välein vuodelle 2030 (ja myös vuosille 2050 ja 2100). Sääaineisto on tarkoitettu rakennusten energiankulutuksen ennakointiin. Tulevaisuuden testivuosien sääaineistoja ei luonnollisesti pidä tulkita ennusteina juuri kyseisille ajanhetkille. Yksittäisten simuloitujen arvojen sijasta tulee tarkastella aineiston tilastollisia ominaisuuksia. Lisäksi on muistettava, että sekä nykyisen että tulevaisuuden ilmaston testivuosien säätietoihin aiheuttaa epävarmuutta ilmaston luonnollinen vaihtelu vuosikymmenestä ja myös 30-vuotiskaudesta toiseen. Testivuosiin 2050 ja 2100 vaikuttaa myös oletus varsin suurista kasvihuonekaasujen päästöistä tämän vuosisadan aikana (ns. A2-skenaario). Pienempien päästöjen toteutuessa ilmasto muuttuisi vastaavasti vähemmän. Eri ilmastomallien tulosten eroista aiheutuvaa epävarmuushaarukkaa (esim. Jylhä et al., 2009) ei ole tässä tutkimuksessa otettu huomioon, vaan tulevaisuuden testivuodet perustuvat useiden mallien tulosten keskiarvona saatuun ns. parhaaseen arvioon.

Rakennusten energiankulutuksen kannalta merkittävien ero uuden testivuoden TRY2012 ja tulevaisuuden testivuosien välillä on lämpötilojen kohoaminen. Testivuotta 2030 luonnehtivat seuraavat muutokset:

- Vuoden 2030 tienoilla vuoden keskilämpötila on vyöhykkeestä riippuen 1,2–1,5 astetta korkeampi kuin nykyistä ilmastoa kuvaavana uutena testivuotena. Talvella kes-

kilämpötila nousee noin kaksi astetta, kesällä vajaan asteen. Lämpötilan vaihtelevuus vähenee talvipuolella vuotta (loka-marraskuusta maaliskuu-huhtikuuhun) noin 10 %.

- Auringon kokonaissäteily vaakapinnalle ja sädetä vastaan projisoitu suora säteily ovat hieman nykyistä pienempiä testivuoden 2030 maaliskuu- ja huhtikuussa. Muina vuodenaikoina joko muutokset sinällään tai niiden merkitys rakennusten energiankulutuksen kannalta ovat pieniä. Tämä koskee myös auringon hajasäteilyä.
- Tuuli voimistuu enimmillään 1–2,5 % muutoksen ajoittuessa marras–helmikuuhun. Samalla etelän ja lännen puoleiset tuulet yleistyvät jo hieman pohjois-, itä- ja kaakkoistuulien kustannuksella.
- Ilmastomuutosarviot osoittavat vuodelle 2030 pientä suhteellisen kosteuden kasvua lokakuusta huhtikuuhun. Suhteellisten kosteuksien 95–100%:n välillä olevat arvot yleistyvät talvisin alhaisempien lukemien kustannuksella, kun taas kesällä muutokset ovat pieniä.

Testivuotia 2050 ja 2100 koskevat ilmastolliset muutokset ovat suurempia, ja ne erottuvat ilmaston luonnollisesta vaihtelusta paremmin kuin testivuoden 2030 muutokset.

Ilmastomuutoksen vaikutusta rakennusten energiantarpeeseen vuoteen 2030 mennessä tutkittiin kahden esimerkkirakennuksen avulla käyttäen Vantaan testivuosiaineistoja nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Tulokset osoittavat, että mikäli laskelmien perustana käytetty ilmastomuutoskenaario toteutuu, tutkittujen esimerkkirakennusten tilojen ja ilmanvaihdon lämmitysenergian tarve vähenee noin 10–13 % vuoteen 2030 mennessä ja jäähdytysenergian tarve kasvaa vastaavasti 13–19 %. Koska esimerkkirakennusten jäähdytystarve on melko pieni rakennusten lämmitystarpeeseen verrattuna, rakennusten kokonaisostoenergiankulutus vähenee tulosten mukaan 4–7 % vuoteen 2030 mennessä. Laskelmissa ei ole otettu huomioon rakentamismääräysten mahdollisten muutosten tuomia epäsuoria vaikutuksia.

Rakennusten energiankulutuksen laskelmat perustuivat siis tyypillisiä sääoloja edustaviin testivuosiaineistoihin, kun taas rakennusten lämmitysjärjestelmien mitoitus varten tarkasteltiin kuuden viime vuosikymmenen kaikkein kireimpiin kuuluvia pakkasia. Koska Suomessa säät ovat niin nykyisin kuin tulevaisuudessakin sangen vaihtelevia, myös rakennusten energiantarve vaihtelee vuodesta toiseen. Kun otetaan huomioon tämän tutkimuksen tuloksena saatu melko maltillinen lämmitysenergian tarpeen vähenemistrendi sekä lämmitysjärjestelmien mitoituslämpötilojen pysyminen toistaiseksi ennallaan, voidaan todeta, että myös vuonna 2030 rakennukset tulee edelleen varustaa kunnan lämmitysjärjestelmillä. Toisaalta on samalla syytä varautua jäähdytyksen tarpeen kasvuun kesällä. Ulkoilman lämpötilojen kohoaminen edellyttää huonelämpötilan hallinnan suunnittelua ja tarkoituksenmukaisten keinojen käyttämistä sisätilojen ylläpitämisen estämiseksi. Ensisijaisesti tulisi käyttää passiivisia jäähdytysratkaisuja, kuten auringonsuojauksia, ja vasta tarvittaessa koneellista jäähdytystä.

Kirjallisuusviitteet

- Allison I., Bindoff N.L., Bindschadler R.A., Cox P.M., de Noblet N., England M.H., Francis J.E., Gruber N., Haywood A.M., Karoly D.J., Kaser G., Le Quéré C., Lenton T.M., Mann M.E., McNeil B.I., Pitman A.J., Rahmstorf S., Rignot E., Schellnhuber H.J., Schneider S.H., Sherwood S.C., Somerville R.C.J., Steffen K., Steig E.J., Visbeck M., Weaver A.J., 2009: The Copenhagen Diagnosis, 2009: Updating the World on the Latest Climate Science. The University of New South Wales Climate Change Research Centre (CCRC), Sydney, Australia, 60 s.
- Blunden J., Arndt D.S., Baringer M.O., Eds., 2011: State of the Climate in 2010. Bull. Amer. Meteor. Soc., 92, S1–S266.
- Carter T.R., Kankaanpää S., 2003: A preliminary examination of adaptation to climate change in Finland. The Finnish Environment 640, Finnish Environment Institute, 66 s.
- Conway T., Tans P., 2011: Globally averaged marine surface annual mean data. NOAA/ESRL The Global Monitoring Division of NOAA/Earth System Research Laboratory. ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2_annmean_gl.txt (verkkosivustolla käyty 10.10.2011)
- Dogniaux R., Sneyers R., 1977: Méthodologie d'analyse statistique des données météorologique en vue de la constitution de périodes-types pour l'application à des problèmes spécifiques. In Rapport des Journées Internationales d'Etude sur chauffage solaire dans le bâtiment. Liège, Belgium, September 12–14.
- Drebs A., Nordlund A., Karlsson P., Helminen J., Rissanen P., 2002: Tilastoja Suomen ilmastosta 1971–2000. Ilmatieteen laitos, Raportteja 2002:1, 99 s.
- Finkelstein J.M., Schafer R.E., 1971: Improved goodness-of-fit tests. Biometrika, 58, 641–645.
- Gregow H., Ruosteenoja K., Pimenoff N., Jylhä K., 2011: Changes in the mean and extreme geostrophic wind speeds in Northern Europe until 2100 based on nine global climate models. Int. J. Climatol., DOI: 10.1002/joc.2398.
- 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. [S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, U.K. 996 pp. Verkkosoite: www.ipcc.ch.
- Jylhä K., Ruosteenoja K., Räisänen J., Venäläinen A., Tuomenvirta H., Ruokolainen L., Saku S., Seitola T., 2009: Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten. ACCLIM-hankkeen raportti 2009. Ilmatieteen laitos. Raportteja 2009:4, 102 s.
- Kalamees T., Kurnitski J. 2006: Estonian test reference year for energy calculations. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Engineering, 12, 40–58.
- Kalamees T., Jylhä K., Tietäväinen H., Jokisalo J., Ilomets S., Hyvönen R., Saku S., 2011: Development of weighting factors for climate variables for selecting the energy reference year according to the EN ISO 15927-4 standard. Energy and Buildings, doi:10.1016/j.enbuild.2011.11.031.
- Kistler R., Kalnay E., Collins W., Saha S., White G., Woollen J., Chelliah M., Ebisuzaki W., Kanamitsu M., Kousky V., van den Dool H., Jenne R., Fiorino M., 2001: The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82, 247–268.
- Klucher T.M., 1979: Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. Solar Energy, 23, 111–114.
- Kondratyev K., 1977: Radiation regime of inclined surfaces. WMO Technical Note 152, Geneve, 82 s.
- Kragh J., Pedersen F., Svendsen S., 2005: Weather Test Reference Year of Greenland. Proceedings of the 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries. Reykjavik. 1147–1154.
- Levermore G.J., Parkinson J.B., 2006: Analyses and algorithms for new Test Reference Years and Design Summer Years for the UK, Building Services Engineering Research and Technology, 27, 311–325.
- LVTY, 1966: Lämmitys- ja ilmanvaihtolaitteiden suunnittelun normaaliohjeet. Lämpö- ja vesijohdoteknillinen yhdistys r.y., Helsinki.
- Marion W., Urban K., 1995: User's Manual for TMY2s – Typical Meteorological Years, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, USA.
- Meehl G. A., Covey C., Delworth T., Latif M., McAvaney B., Mitchell J. F. B., Stouffer R. J., Taylor K.E., 2007: The WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: A New Era in Climate Change Research. Bull. Amer. Meteor. Soc. 88, 1383–1394.

- NCC, 1981: Typical Meteorological Year User Manual, TD-9734, Hourly Solar Radiation - Surface Meteorological Observations, National Climatic Center. Asheville, North Carolina.
- Pilli-Sihvola K, Aatola P., Ollikainen M., Tuomenvirta H., 2010: Climate change and electricity consumption – Witnessing increasing or decreasing use and costs? *Energy Policy*, 38, 2409–2419.
- Rahman I.A., Dewsbury J., 2007: Selection of typical weather data (test reference years) for Subang, Malaysia. *Building and Environment*, 42, 3636–3641.
- RakMk A4, 2000: Rakennuksen käyttö- ja huolto-ohje, määräykset ja ohjeet. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. 7 s.
- RakMk C3, 2010: Rakennusten lämmöneristys. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. 62 s.
- RakMk D5, 2007: Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehotarpeen laskenta, ohjeet 2007. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. 62 s.
- RakMk D3, 2012: Rakennusten energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto, 30.3.2011, 35 s.
- Rossi V., 1975: The shadowing-ring correction for sky radiation pyranometers, *Ilmatieteen laitoksen toimituksia No 82*, Helsinki.
- Ruosteenoja K, Tuomenvirta H, Jylhä K., 2007: GCM-based regional temperature and precipitation change estimates for Europe under four SRES scenarios applying a super-ensemble pattern-scaling method. *Climatic Change*, 81, 193–208.
- Räisänen J., Hansson U., Ullerstig A., Döscher R., Graham L.P., Jones C., Meier H.E.M., Samuelsson P., Willén U., 2004. European climate in the late 21st century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. *Clim. Dyn.*, 22, 13–31.
- Saksakulm U., 1996: Design outdoor temperature in Estonia. Licentiat thesis. Kungliga Tekniska högskolan. Serie: Klimat och byggnader, 99-0685576-2; Rapport 4016 1996:1.
- SFS EN ISO 15927-4, 2005. Hygrothermal performance of buildings – Calculation and presentation of climatic data – Part 4: Data for assessing the annual energy for heating and cooling. (Rakennusten lämpö- ja kosteustekninen käyttäytyminen. Säättietojen laskenta ja esittäminen. Osa 4: Tuntitiedot lämmityksen ja jäähtymisen vuotuisen energiantarpeen laskentaan)
- SNiP II-A.6-72, 1973: Stroitel'naja klimatologija i geofizika. Moskva, 1973.
- SS 02 43 10, 1991: Svensk Standard Dimensioning outdoor temperature – The power need of buildings. Stockholm, SIS – Standardiseringskommissionen i Sverige, SVENSK STANDARD SS02 43 10.
- Tammelin B., Erkiö E., 1987: Energialaskennan säättiedot – suomalainen testivuosi. Ilmatieteen laitos. Helsinki. 108 s.
- Temps R.C., Coulson K.L., 1977: Solar Radiation incident upon slopes of different orientations. *Solar Energy*, 19, 79–184.
- Tietäväinen H., Tuomenvirta H., Venäläinen A., 2010: Annual and seasonal mean temperatures in Finland during the last 160 years based on gridded temperature data. *Int. J. Climatol.*, 30, 2247–2256.
- Tilastokeskus, 2009: Rakennukset ja kesämökkit -tilasto. ISSN=1798-677X. Helsinki.
- Vajda A., Venäläinen A., Tuomenvirta H., Jylhä K., 2003: An estimate about the influence of climate change on heating energy demand in Hungary, Romania and Finland. *Idojaras*, 108, 123–140.
- Venäläinen A., Tammelin B., Tuomenvirta H., Jylhä K., Koskela J., Turunen M.A., Vehviläinen B., Forsius J., Järvinen P., 2004a: The influence of climate change on energy production & heating energy demand in Finland. *Energy & environment*, 15, 93–109.
- Venäläinen A., Tammelin B., Sarkkula, S., 2004b: Tilastoja lämmitystarveluvusta Suomessa 1971–2000. Ilmatieteen laitos, Ilmastotilastoja Suomesta No. 2, 32 s.
- 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 s.
- Vertačnik G., 2008: Test Reference Year. Report of Environmental Agency of the Republic of Slovenia. Ljubljana, June 2008.
- WSL, 1992: User Manual: Engineering Data Sets of Hourly Weather Observations in WYEC2 Format (WYEC2 Files) and Canadian Weather for Energy Calculations (CWEC Files), Watsun Simulation Laboratory, University of Waterloo, Ontario, October 20 1992.

Liitteet

Liite 1. Lämmitystarvelukujen laskeminen

Lämmitystarveluku saadaan laskemalla yhteen kuukauden jokaisen vuorokauden sisä- ja ulkolämpötilojen erotus. Yleisimmin käytetään lämmitystarvelukua S17, joka lasketaan +17 °C:ksi oletetun sisälämpötilan ja ulkolämpötilan vuorokausikeskiarvon erotuksen perusteella.

Rakennuksen lämmitysenergian tarvetta pienentää auringon säteilystä sekä sisäisistä lämmönlähteistä (valaistus, ihmiset, laitteet) hyödyksi saatava energia. Sen oletetaan kattavan laskennallisen sisälämpötilan +17 °C ja todellisen sisälämpötilan eron.

Kuukauden lämmitystarveluku on vuorokausittaisten lämmitystarvelukujen summa. Vuoden lämmitystarveluku on vastaavasti kuukausittaisten lämmitystarvelukujen summa. Mitä kylmempi vuosi on, sitä suurempi on kyseisen vuoden lämmitystarveluku.

Lämmitystarveluvun laskennassa ei oteta huomioon päiviä, joiden keskilämpötila on keväällä yli +10 °C ja syksyllä yli +12 °C. Tällöin oletetaan, että kiinteistöjen lämmitys aloitetaan em. ulkolämpötilojen alittuessa ja lopetetaan niiden ylittyessä. Tässä raportissa 10 asteen kynnysarvoa sovelletaan tammi-kesäkuussa ja 12 asteen rajaa heinä-joulukuussa.

Esimerkkejä lämmitystarveluvuista on annettu taulukossa L1.1. Siitä ilmenee, että Vantaalla vuoden 1979 lämmitystarveluku oli 5 % ja Jyväskylässä 1 % suurempi kuin pitkän ajan (1971–2000) keskimääräiset lämmitystarveluvut. Vielä enemmän vuoden 1979 lämmitystarveluvut poikkeavat 2000-luvun ensimmäisen vuosikymmenen (2001–2010) keskimääräisistä lämmitystarveluvuista: Vantaalla 12 % ja Jyväskylässä 7 %. Vuosien 2001–2010 lämmitystarveluvut vaihtelivat Vantaalla -19 % ja +10 % välillä ja Jyväskylässä -13 % ja +9 % välillä verrattuna saman kauden keskiarvoon.

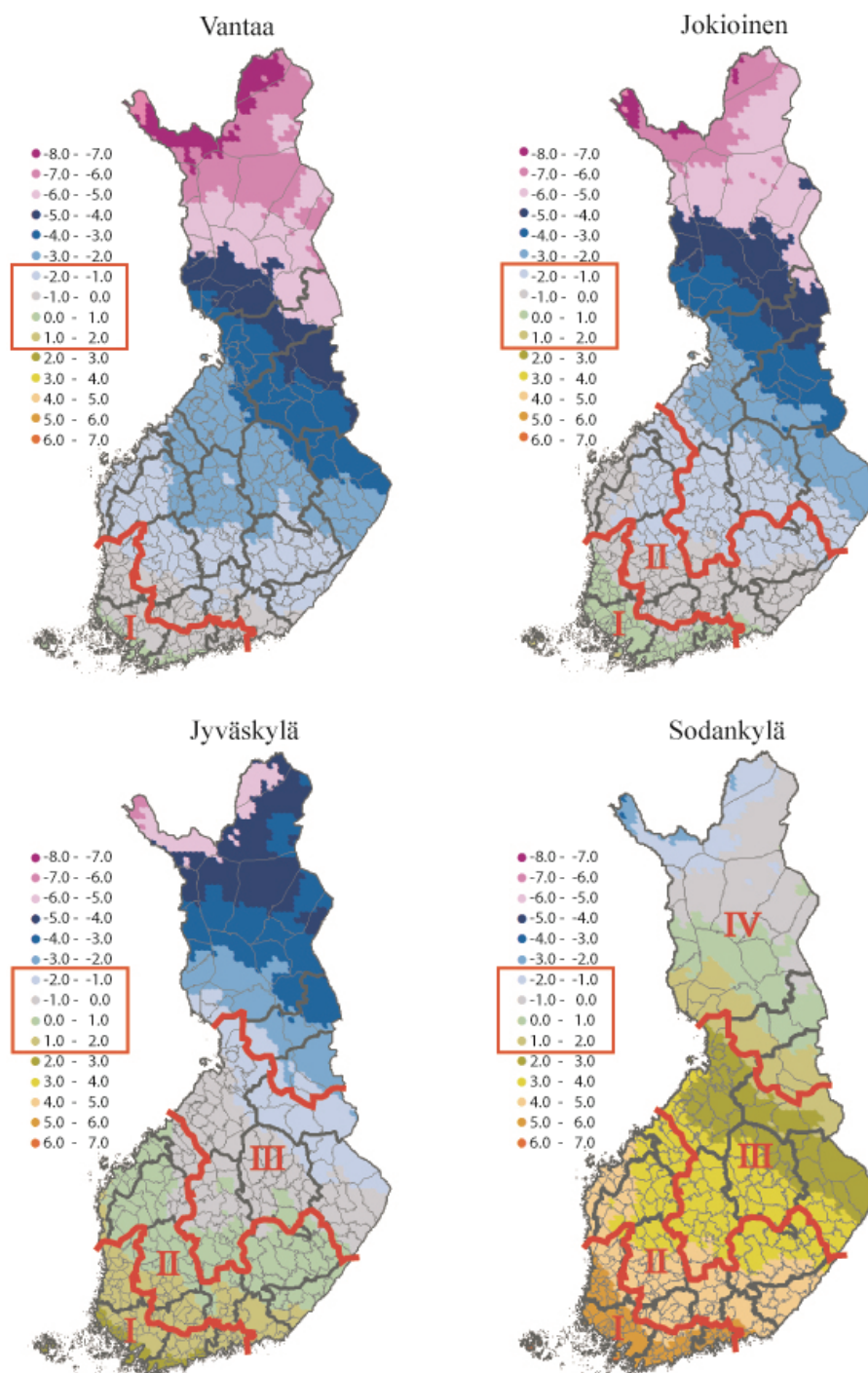
Taulukko L1.1. Lämmitystarveluvut S17 (yksikkö Kd) vuonna 1979 (RakMk D5, 2007) sekä jaksojen 1971–2000 ja 2001–2010 keskiarvot Vantaalla ja Jyväskylässä.

Vuosi	Vantaa	Jyväskylä
1979	4447	4997
30v. jakso (1971–2000) ka.	4229	4945
10v. jakso (2001–2010) ka.	3979	4691

Uuden testivuoden TRY2012 mukaiset kuukausittaiset ja koko vuoden lämmitystarveluvut on esitetty luvussa 6 ja liitteessä 6. Samoin on vertailun vuoksi annettu myös koko 30-vuotisjakson 1980–2009 sääaineistoista lasketut lämmitystarveluvut.

Liite 2. Uusi vyöhykejako: täydentävää tietoa

Energialaskennan ja mitoituslämpötilan vyöhykejaon toimivuutta tarkasteltiin laskemalla keskimääräisen vuosikeskilämpötilan poikkeama vuorollaan kunkin neljän havaintoaseman keskilämpötilasta. Poikkeamien maantieteelliset jakaumat on esitetty kuvassa L2.1.



Kuva L2.1. Jakson 1980–2009 keskimääräisen vuosikeskilämpötilan poikkeama (°C) kunkin havaintoaseman keskiarvosta. Vuosikeskilämpötilan arvot havaintoasemilla ovat seuraavat: Vantaa 5,3 °C, Jokioinen 4,6 °C, Jyväskylä 3,2 °C ja Sodankylä -0,4 °C. Ilmastollisten vyöhykkeiden (I-IV) rajat on esitetty kartalla punaisella.

Liite 3. Puuttuvat havainnot ja säteilysuureiden laskenta

Puuttuvien havaintojen korjaaminen

Puuttuvien havaintojen lukumäärä lopulta muodostetun testivuoden aikana kullakin havaintoasemalla sekä niiden korvaamiseen käytetyt menetelmät on kerrottu taulukoissa L3.1–L3.2.

Taulukko L3.1. Puuttuvien säähavaintojen lukumäärä ja suluissa niiden prosenttiosuus havaintojen kokonaismäärästä ($8 \cdot 365 = 2920$, säteilysuureille $24 \cdot 365 = 8760$) eri havaintoasemien testivuosiaineistoissa.

Säämuuttuja	Vantaa	Jyväskylä	Sodankylä
Ilman lämpötila	ei puuttuvia	21 (0,7%)	1 (0,0%)
Suhteellinen kosteus	ei puuttuvia	21 (0,7%)	1 (0,0%)
Tuulen nopeus	ei puuttuvia	21 (0,7%)	2 (0,0%)
Tuulen suunta	ei puuttuvia	23 (0,8%)	2 (0,0%)
Kokonaissäteily vaakapinnalle	24 (0,3 %)	ei puuttuvia	2 (0,0%)
Hajasäteily vaakapinnalle	24 (0,3 %)	ei puuttuvia	2 (0,0%)

Taulukko L3.2. Puuttuvia arvoja sisältäneet ajanjaksot sääsuureittain (T = ilman lämpötila, RH = suhteellinen kosteus, WS = tuulen nopeus, WD = tuulen suunta, Glrad = auringon kokonaissäteily, RDIF = hajasäteily) sekä arvojen korvaaminen interpoloimalla tai taulukon viimeisessä sarakkeessa annetun havaintoaseman tiedoilla.

Havainto- asema	T	RH	WS	WD	Glrad	RDIF	Ajanjakso	Korvaustapa
Vantaa					x	x	1.7.2008 00 – 1.7.2008 23 UTC	Helsinki Kumpula
	x	x	x	x			23.2.2004 00 – 23.2.2004 15 UTC	Jämsä Halli
Jyväskylä	x	x	x	x			10.5.2008 09 – 12.5.2008 03 UTC	Jämsä Halli
				x			7.5.2008 18 UTC	interpoloitu
				x			17.7.2009 00 UTC	interpoloitu
					x	x	24.5.2007 17 – 24.5.2007 18 UTC	interpoloitu
Sodankylä	x	x	x	x			15.4.2009 00 UTC	Sodankylä autom.
			x	x			27.4.2009 12 UTC	Sodankylä autom.

Hajasäteilyn korjaus ja projisoidun suora säteilyn laskenta

Ilmatieteen laitos teki auringonsäteilyn mittaukset 1980-luvulle asti käyttäen paikallista aurinkoaikaa. Se poikkeaa Suomen normaaliajasta testivuoden kolmella sääasemalla muutamista minuuteista aina puoleen tuntiin riippuen vuodenajasta. Tätä auringonsäteilyn vanhaa havaintoaineistoa on Ilmatieteen laitoksen tietokannassa täydennetty laskemalla UTC-aikaa vastaavat arvot. Uudempi havaintoaineisto perustuu säteilysummiin, jotka on kirjattu tasatunneittain UTC-ajassa.

Koska auringonsäteilyn vuot on annettu yhden tunnin yli laskettuina keskiarvoina, herää kysymys, miten yhden tunnin säteilymäärä lasketaan eri ilmansuuntiin osoittaville seinäpinoille, kun auringon suuntakulma vaihtelee yhden tunnin sisällä. Tässä tarkastelussa on valittu laskenta-ajankohdaksi tunnin jakson keskikohta, toisin sanoen ajanhetket (paikallista aikaa) 0.30, 1.30, ..., 11.30, 12.30 jne. Näin saadaan kutakin aikasarjan havaintoa vastaamaan tietty auringon korkeuskulma ja suuntakulma.

Hajasäteilyä mitattaessa käytetään varjostusrengasta, jonka tarkoituksena on estää suoraa säteilyä vaikuttamasta mittaustulokseen, mutta samalla myös osa hajasäteilystä jää mittamatta. Korjattu hajasäteilyn vuo vaakatasolle (=RDIF) laskettiin Rossin (1975) esittämällä tavalla käyttäen kerrointa Δd , jolla korjataan tämä varjostusrenkaan aiheuttama virhe:

$$\Delta d = \left(1 + \frac{k}{100}\right). \quad (\text{L3.1})$$

Tekijä k riippuu mitatusta hajasäteilyn D_h ja kokonaissäteilyn K_h (=G_{rad}) vuosta vaakatasolle:

$$k = a \cdot b^c, \quad (\text{L3.2})$$

missä $a = 30,98$, $b = 0,117$ ja

$$c = D_h / K_h. \quad (\text{L3.3})$$

Koska kaava (L3.2) on likimääräinen, laskennan aikana ilmeni, että korjattu hajasäteily määrä tuli joskus suuremmaksi kuin mitattu kokonaissäteilyn määrä vaakapinnalle. Tällöin asetettiin hajasäteilyn tuntiarvo samaksi kuin kokonaissäteilyn tuntiarvo.

Suoran säteilyn vuo vaakatasolle saadaan kokonaissäteilyn ja korjatun hajasäteilyn erotuksena, ja suoran säteilyn vuo S_m (=RDIR) säteilyä vastaan kohtisuoralle pinnalle saadaan yhtälöstä

$$S_m = \frac{K_h - (D_h \cdot \Delta d)}{\sin(h_0)} \quad (\text{L3.4})$$

missä h_0 = auringon korkeuskulma.

Huomattakoon, että jos kaavassa (L3.4) korkeuskulma $h_0 < 5^\circ$, asetettiin kuitenkin $S_m = 0$. Tähän päädyttiin siksi, että hyvin pienet auringon korkeuskulmat antavat kohtuuttoman suuria suoran säteilyn arvoja auringon säteitä vastaan kohtisuoraan olevalle pinnalle. Asetuksen $S_m = 0$ seurauksena ”yli jäävä” suora säteily vaakatasolle lisättiin korjattuun hajasäteilyyn.

Auringon säteily erisuuntaisille pystypinnoille

Suomen nykyisen rakentamismääräyskokoelman osan D5 (RakMk D5, 2007) liite 1 energiankulutuksen laskennassa käytettävistä säätiedoista sisältää taulukoita, joissa annetaan kuukausitasolla auringonsäteilyn kokonaismäärät erisuuntaisille seinäpinnoille. Niitä vuonna 2006 laskettaessa käytettiin olettamusta, että sekä hajasäteily että heijastunut säteily ovat isotrooppisia, ts. ne eivät riipu auringon suuntakulmasta. Tämän mallin mukaan seinille tuleva hajasäteilyn (heijastuneen säteilyn) määrä on puolet vaakapinnalle tulevan hajasäteilyn (heijastuneen säteilyn) määrästä riippumatta seinäpinnan suunnasta.

Uudistumassa olevan rakentamismääräyskokoelman osan D3 (RakMk D3, 2012) vastaavassa liitteessä olevat hajasäteilyn ja heijastuneen säteilyn määrät laskettiin aiemmasta poiketen kaavoilla, joissa on mukana auringon kulloinenkin suuntakulma ja seinän suuntakulma sekä hajasäteilyä tarkasteltaessa myös likimääräinen arvio pilvisyyden vaikutuksesta. Seuraavassa tarkastellaan kyseisiä kaavoja.

Temps ja Coulson (1977) esittivät anisotrooppiselle hajasäteilylle D_s kaavan

$$D_s = D_h^k \cdot \cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) \left(1 + \sin^3\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right) \left(1 + \cos^2 i \cdot \sin^3(90^\circ - h_0)\right) \quad (\text{L3.5})$$

missä

D_h^k = hajasäteilyn määrä vaakapinnalla, kun mittausarvoa on korjattu ottamalla huomioon varjostusrenkaan vaikutus ($D_h^k = \text{RDIF}$).

α = pinnan kaltevuuskulma vaakatasoon verrattuna

h_0 = auringon korkeuskulma ajanhetkillä 0.30, 1.30, jne. paikallista aikaa

i = auringon säteiden ja kaltevan pinnan välinen kulma.

Klucher (1979) lisäsi kaavaan (L3.5) pilvisyyden vaikutusta kuvaavan termi q , joka määritellään vaakapinnalle tulevan kokonaissäteilyn K_h ja hajasäteilyn D_h^k avulla:

$$q = 1 - \left(\frac{D_h^k}{K_h}\right)^2 \quad (\text{L3.6})$$

Tällöin anisotrooppisen hajasäteilyn kaava kirjoitetaan muodossa

$$D_s = D_h^k \cdot \cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) \left(1 + \sin^3\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right) \left(1 + q \cdot \cos^2 i \cdot \sin^3(90^\circ - h_0)\right) \quad (\text{L3.7})$$

Heijastuneelle säteilylle Temps ja Coulson (1977) ovat esittäneet auringon suuntakulmat sekä seinän suuntakulmat sisältävän kaavan, joka voidaan pystysuoraa seinää ($\alpha = 90^\circ$) tarkasteltaessa esittää muodossa:

$$R_s = \frac{1}{2} R_h \left[1 + \sin^2\left(\frac{90^\circ - h_0}{2}\right) \right] \cdot (|\cos(\psi_0 - \psi_n)|) \quad (\text{L3.8})$$

missä

R_h = mitattu heijastuneen auringonsäteilyn määrä vaakapinnalla (mittaus suoritetaan alaspäin suunnatulla pyranometrillä),

Ψ_0 = auringon suuntakulma

Ψ_n = rinteen/seinän normaalin suuntakulma vaakatasossa.

Atsimuuttikulmat Ψ_0 ja Ψ_n ovat kohteen kulmaetäisyyksiä mitattuna myötäpäivään etelästä pitkin horisonttia, ja ne siis ilmoittavat sen ilmansuunnan, jossa kohde näkyy. Yleisesti käytetään seuraava merkintätapaa: pohjoisessa atsimuutti on 0 astetta, idässä 90 astetta, etelässä 180 astetta ja lännessä 270 astetta.

Suoran säteilyn vuo S_s kaltevalle pinnalle on (Kondratyev, 1977)

$$S_s = S_m \cos i, \quad (\text{L3.9})$$

missä

S_m = suoran auringonsäteilyn vuo säteitä vastaan kohtisuoralle pinnalle (=RDIR)

i = auringon säteiden ja kaltevan pinnan välinen kulma

Kaavan (L3.9) kosinitermi voidaan kirjoittaa auki auringon korkeus- ja suuntakulmien ja seinän normaalin suuntakulmien avulla seuraavasti

$$\cos i = \cos \alpha \sinh_0 + \sin \alpha \cosh_0 \cos \Psi \quad (\text{L3.10})$$

missä

α = pinnan kaltevuus vaakatasoon verrattuna

h_0 = auringon korkeuskulma

Ψ = $\Psi_0 - \Psi_n$, missä Ψ_0 on auringon suuntakulma

Ψ_n = rinteen/seinän normaalin suuntakulma vaakatasolle.

Kun tarkastellaan pystypintoja, $\alpha = 90^\circ$, joten voidaan kirjoittaa

$$S_s = S_m \cosh_0 \cos(\Psi_0 - \Psi_n) \quad (\text{L3.11})$$

Säteilyn kokonaismäärä seinäpinnalle saadaan laskemalla auringonsäteilyn eri komponentit yhteen:

$$K_s = S_s + D_s + R_s \quad (\text{L3.12})$$

Hajasäteilyn kaavaa (L3.7) sovellettiin siten, että seinillä, jotka olivat vähintään $\pm 90^\circ$ auringon suunnasta, annettiin suuntakosinista riippuvalle sulkulausekkeelle arvoksi 1. Tällöin varjonpuoleiset seinät saivat vähemmän hajasäteilyä kuin siinä tapauksessa että termille $\cos^2 i$ olisi käytetty seinän suunnan mukaista arvoa. Ilman tätä algoritmin muutosta pohjoisseinälle olisi saatu talvikuukausina suuremmat hajasäteilysummat kuin koillis- tai itäseinälle.

Sodankylän testivuosiaineistoa varten heijastunut säteily laskettiin lokakuusta helmikuuhun isotrooppisella mallilla kaavan (L3.8) asemesta. Vantaalle ja Jyväskylälle heijastunut säteily laskettiin isotrooppisella mallilla marraskuusta helmikuuhun. Maaliskuussa kaikilla paikoilla heijastuneen säteilyn jokainen tunti-arvo jaettiin kahteen yhtä suureen osaan. Toinen tunti-arvon puolikas käsiteltiin isotrooppisella mallilla, toinen puolikas anisotrooppisella mallilla. Muina kuukausina heijastunut säteily laskettiin anisotrooppisella mallilla kaavaa (L3.8) käyttäen.

Säteilysuureiden laskennan tulokset testivuodelle TRY2012 on esitetty liitteessä 8. On kuitenkin todettava, että valittu hajasäteilymalli ei ole paras mahdollinen Suomen talvioloihin. Käytetyt hajasäteilyn ja heijastuneen säteilyn laskentakaavat antavat keskimäärin hyvän approksimaation pystypinnoille tai vinoille pinnoille, mutta kun aurinko paistaa matalalla ja lumipeite heijastaa runsaasti säteilyä pystypinnoille, voivat yksittäiset lasketut tunti-arvot poiketa suurestikin siitä, mitä olisi saatu mittaamalla auringon kokonaissäteilyn määrää pystypinnalla. Vaihtoehtoisten mallien syöttöaineistoksi voidaan TRY2012:n käyttäjälle toimittaa pyynnöstä testivuosi-kuukausien alkuperäiset auringonsäteilyarvot eli kokonaissäteilyn vaakapinnalle, korjaamattoman hajasäteilyn vaakapinnalle sekä heijastuneen säteilyn.

Lisäksi on syytä muistaa, että testivuoden kuukausia valittaessa auringonsäteily otettiin toki huomioon, mutta sen merkitys oli pienempi kuin lämpötilan (luku 5.2). Niinpä TRY2012 soveltunee vain välttävästi pitkän aikavälin aurinkoenergiatarkasteluihin. Esimerkiksi kaltevalle etelänsuuntaiselle pinnalle kertyvästä keskimääräisestä auringonsäteilystä eri kuukausina saadaan tarkempi arvio käyttämällä testivuosiaineiston asemesta säteilyhavaintoja koko 30 vuoden ajalta.

Pystypinnoille tulevan auringon kokonaissäteilyenergian laskettuja arvoja on esitetty myös uudistumassa olevan rakentamismääräyskokoelman osan D3 (RakMk D3, 2012) liitteessä 2. Kyseiset taulukkoarvot poikkeavat jonkin verran tämän raportin liitteessä 8 esitetyistä tuloksista. Tämä johtuu siitä, että D3:n arvoja laskettaessa ei käytetty varjopuolen suunnille kaavan (L3.7) muunnosta eikä toisaalta käytetty isotrooppista mallia heijastuneelle säteilylle talvikuukausina. Pienehkö noin 0,5 % vaikutus oli lisäksi sillä, että D3:n säteilysummia laskettaessa kaavan (L3.4) yhteydessä mainittua suoran säteilyn lisäämistä hajasäteilyyn auringon pienillä korkeuskulmilla ei vielä tehty eikä myöskään otettu huomioon tämän lisäyksen vaikutusta termiin q kaavassa (L3.6). Näistä laskentatavan muutoksista johtuen liitteessä 8 esitetyt auringon kokonaissäteilyenergian vuosisummat ovat pohjoiseen suuntautuville pystypinnoille 4–5 % pienempiä ja muilla suunnilla yleisesti 4–10% suurempia kuin D3:n liitteessä 2 annetut vuosisummat.

Liite 4. Standardin mukaisten testikuukausien valinta

Yhteenveto energialaskennan testikuukausien valinnan ensimmäisen vaiheen tuloksista SFS EN ISO 15927-4 standardin mukaisella menetelmällä on esitetty taulukoissa L4.1–4.3. Kolmelle säämuuttujalle (lämpötila, kosteus ja kokonaissäteily) on esitetty ne viisi kuukautta, jotka poikkesivat vähiten pitkäaikaisesta sääaineistosta. Lihavoituina ovat ne kolme kuukautta, joilla kaikkien kolmen säämuuttujan Finkelstein-Schaferin parametrien (painottamaton) summa (kaava 5.2) oli pienin. Niistä kolmesta poimittiin se kuukausi (esitetty harmaalla varjostettuna), jolloin tuulen nopeuden keskimääräinen ero pitkäaikaiseen sääaineistoon nähden oli pienin. Näitä välituloksina saatuja testikuukausia käytettiin luvussa 5, kun analysoitiin, kuinka paljon eri säämuuttujat vaikuttavat rakennusten energiantarpeeseen.

Taulukko L4.3. Vantaan (vyöhykkeet I–II) vuosien 1980–2009 säähavaintoaineiston perusteella valitut ne viisi kuukautta, joiden aikana sääsuureen tilastollinen jakauma muistutti eniten koko 30-vuotisjakson keskimääräistä jakaumaa.

Järjestys	Vuosi											
	Tammi- kuu	Helmi- kuu	Maalis- kuu	Huhti- kuu	Touko- kuu	Kesä- kuu	Heinä- kuu	Elo- kuu	Syys- kuu	Loka- kuu	Marras- kuu	Joulu- kuu
Lämpötilan perusteella valitut kuukaudet												
1.	1981	2004	2004	2009	2005	1990	1983	2003	1997	1981	1984	1998
2.	1984	1998	1999	1991	1998	2000	1991	1990	1980	2007	1989	1999
3.	1990	2005	2000	2006	2006	2001	1989	1995	1988	1991	2006	1983
4.	2002	1988	1994	1980	2008	1998	1982	2004	1995	2004	2004	1984
5.	2006	1982	2008	1995	2004	2005	1992	1994	1981	1999	1997	1980
Kosteuden perusteella valitut kuukaudet												
1.	2000	1998	1994	1992	2004	1983	2000	1989	1998	1999	1999	1998
2.	1994	2005	1997	2009	1996	2001	1981	2003	1999	1991	2004	1983
3.	1990	1982	1993	2007	1982	2008	2008	1981	1981	2004	1984	1980
4.	2009	2004	1983	1986	2002	2005	1983	1996	1980	1985	1997	1984
5.	1981	1984	1988	2005	1988	1981	1998	1980	1988	1983	2007	1999
Säteilyn perusteella valitut kuukaudet												
1.	1995	2009	1994	1982	2006	2000	1986	2003	1989	1989	2008	2005
2.	1989	2005	1990	1998	1990	1983	1991	2009	1991	1995	1993	1998
3.	2004	1982	2004	2005	1989	2005	2002	2004	1982	1987	1999	2006
4.	1980	2004	2007	2007	1985	1995	2008	1999	2001	1992	2007	1983
5.	2000	2006	1999	2000	2000	1990	1989	1990	1996	1999	1989	2009
Lämpötilan, kosteuden, säteilyn ja tuulen perusteella valitut kuukaudet												
1.	1981	2004	1994	2009	2006	2001	1989	2003	1998	1998	1989	1998
2.	1994	2005	2004	2007	2005	2005	2008	1990	1997	1990	2004	1983
3.	2000	1982	1999	2005	1998	1983	1991	2009	1995	1981	1999	1999
4.	2009	1998	1983	1996	2004	2000	1983	1982	1988	2004	2007	1980
5.	2006	1987	1997	1982	1990	1984	1986	1980	1982	1983	1997	2005

Taulukko L4.4. Kuten taulukko L4.1, mutta Jyväskylän (vyöhyke III) aineistoon perustuen.

Järjestys	Vuosi											
	Tammi- kuu	Helmi- kuu	Maalis- kuu	Huhti- kuu	Touko- kuu	Kesä- kuu	Heinä- kuu	Elo- kuu	Syys- kuu	Loka- kuu	Marras- kuu	Joulu- kuu
Lämpötilan perusteella valitut kuukaudet												
1.	1981	1982	2008	2006	2008	2001	1982	1990	1997	1981	1984	1983
2.	1988	1997	1999	1991	2004	2007	1981	1995	1980	1988	2007	1984
3.	1984	2004	1991	2002	2000	2000	1980	1994	1981	1983	1989	1998
4.	2000	2005	1983	1996	1988	1985	1999	1982	1985	2006	2006	1980
5.	1991	1988	2000	2004	2006	1990	2006	2009	1988	1991	2004	1993
Kosteuden perusteella valitut kuukaudet												
1.	1981	1997	1997	2007	2002	2008	2000	1990	1980	1985	1984	1984
2.	1988	1998	1988	2009	1988	2006	1990	1995	1997	1983	1999	1998
3.	1990	2005	1999	1991	1981	1983	2004	1994	1995	1988	2004	1983
4.	2009	1982	1994	2002	2005	2005	1983	1982	1981	2004	2007	2003
5.	1991	2004	2008	1986	2009	2001	1998	2009	1994	1999	1997	1993
Säteilyn perusteella valitut kuukaudet												
1.	1995	1987	2004	2003	1999	1985	1989	1980	1998	2008	2002	1998
2.	1993	1992	2003	1996	2000	2009	1999	1990	2006	1989	2008	1992
3.	1989	2001	1985	1995	1989	1995	1995	1999	2008	1995	1993	1980
4.	2006	2004	2002	1986	1980	1988	2008	1985	1989	1983	2004	1996
5.	1994	1997	1997	1988	2006	1983	1987	2003	1993	1997	1992	1981
Lämpötilan, kosteuden, säteilyn ja tuulen 0, perusteella valitut kuukaudet												
1.	1981	1997	1997	2007	2000	1985	1999	1990	1980	1983	2007	1998
2.	1984	2004	1999	1991	2008	1983	2009	1980	1997	1985	2004	1983
3.	1990	1982	2008	2009	2005	2001	1983	2009	1995	1981	1989	1980
4.	1991	2005	2004	1996	2006	2009	1981	1994	1998	2004	2006	1984
5.	2000	2003	1994	2002	1992	2005	2000	1989	1981	1998	1984	2003

Taulukko L4.3. Kuten taulukko L4.1, mutta Sodankylän (vyöhyke IV) aineistoon perustuen.

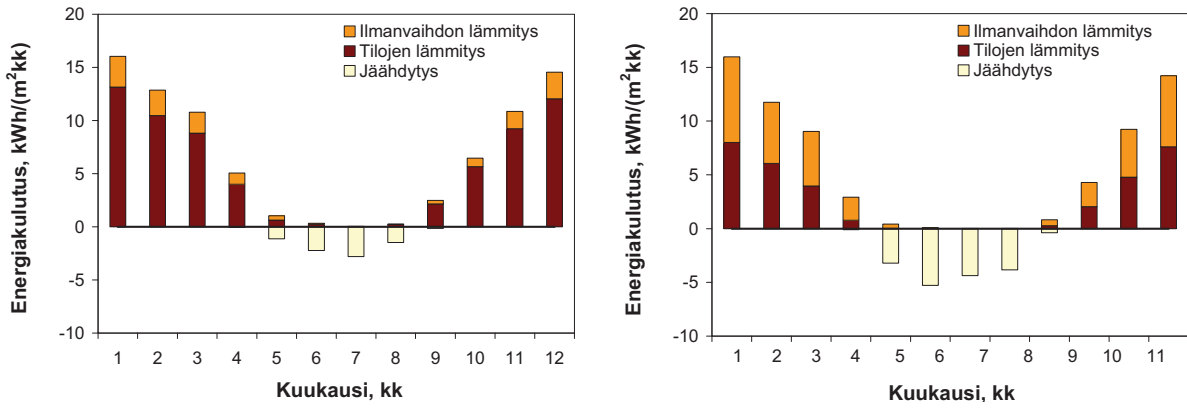
Järjestys	Vuosi											
	Tammi- kuu	Helmi- kuu	Maalis- kuu	Huhti- kuu	Touko- kuu	Kesä- kuu	Heinä- kuu	Elo- kuu	Syys- kuu	Loka- kuu	Marras- kuu	Joulu- kuu
Lämpötilan perusteella valitut kuukaudet												
1.	1988	1999	1985	2009	2007	1985	1982	2003	1998	1981	1981	2003
2.	1998	1983	2004	1984	1986	1997	2001	1994	2003	1995	1985	2000
3.	2000	1997	2000	2001	1981	2007	1994	2004	1985	1991	2008	1997
4.	2007	1988	2002	2008	1988	1984	1983	1990	1982	2003	2007	1998
5.	1981	2009	1999	2004	2005	2009	1980	2001	1980	1988	2006	2009
Kosteuden perusteella valitut kuukaudet												
1.	1988	1999	2009	2007	2002	2006	2009	1993	2003	1995	1981	2003
2.	1998	1983	1999	2004	2007	1992	1986	2001	1985	2003	2008	2000
3.	2007	1997	1997	2001	1991	1985	1991	1997	1998	1985	1996	2009
4.	2000	2004	1985	2003	2005	2005	1999	1989	1989	1984	1985	1997
5.	1981	1988	2004	2009	1993	2000	2000	2008	2005	1981	2007	1998
Säteilyn perusteella valitut kuukaudet												
1.	1997	2004	2008	1987	1989	2001	1987	2005	1988	1990	2007	1991
2.	1994	1983	2002	2005	1997	1980	2009	1984	2007	2008	1997	1983
3.	1990	1993	2000	1999	1995	1999	2000	1999	1989	1985	1994	1982
4.	1989	2009	1998	1997	1993	1988	1991	1990	1991	1988	1984	1990
5.	1998	2006	1994	1993	2001	2006	1997	2000	1994	1995	1992	1999
Lämpötilan, kosteuden, säteilyn ja tuulen perusteella valitut kuukaudet												
1.	1998	1983	1985	2007	2002	1985	2009	2001	1989	1995	2008	2003
2.	2007	2004	2004	1984	2007	2006	1991	1989	1985	1985	1981	2000
3.	2000	1997	2002	2003	2005	1984	2000	1990	1988	1983	2007	1997
4.	1997	2009	1994	2004	1993	1988	1993	2004	1980	2003	1985	1991
5.	1981	1999	2000	2001	2000	2009	1983	2003	1982	1988	1994	1982

Liite 5. Eri ilmastosuureiden vaikutus rakennuksen lämmitys- ja jäähdytysenergian tarpeeseen vyöhykkeillä III ja IV

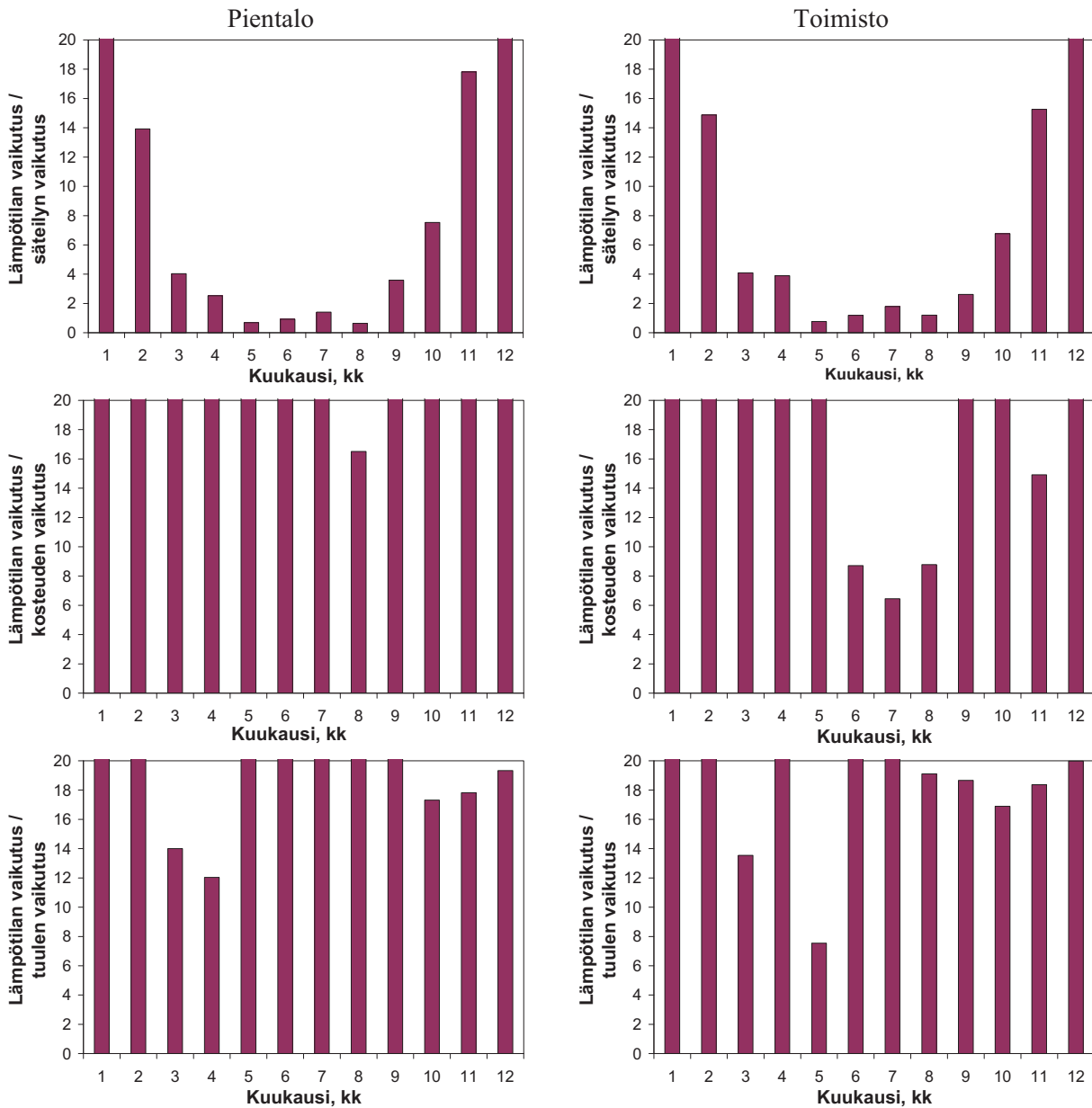
Jyväskylässä sijaitsevan pientalon ja toimiston lämmitys- ja jäähdytysenergian nettotarve standardin mukaisen testivuoden sääaineistoja käyttäen (liite 4) on esitetty kuvassa L5.1. Näiden esimerkkirakennusten lämmitys- ja jäähdytysenergian tarpeen riippuvuus eri ilmastosuureista ilmenee kuvasta L5.2 (lisätietoa luvussa 5.2.2).

Vastaavat tulokset Sodankylässä sijaitsevan pientalon ja toimiston lämmitys- ja jäähdytysenergian nettotarpeesta ja sääsuureiden vaikutuksesta siihen on esitetty kuvissa L5.3 ja L5.4.

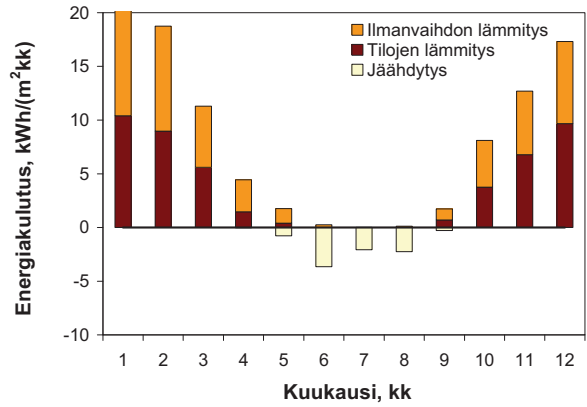
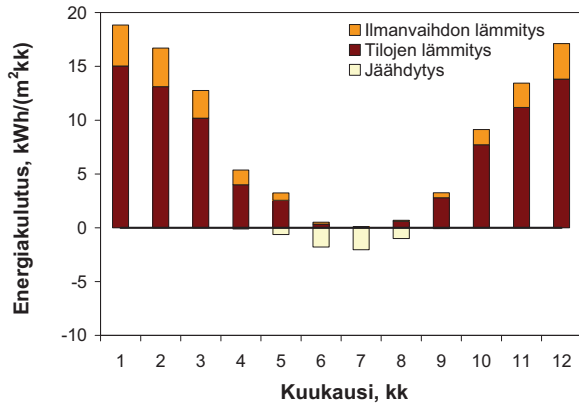
Sekä Jyväskylässä että Sodankylässä säätelijöiden vaikutus esimerkkirakennusten energian tarpeeseen on samansuuntainen kuin Vantaalla (kuva 5.10).



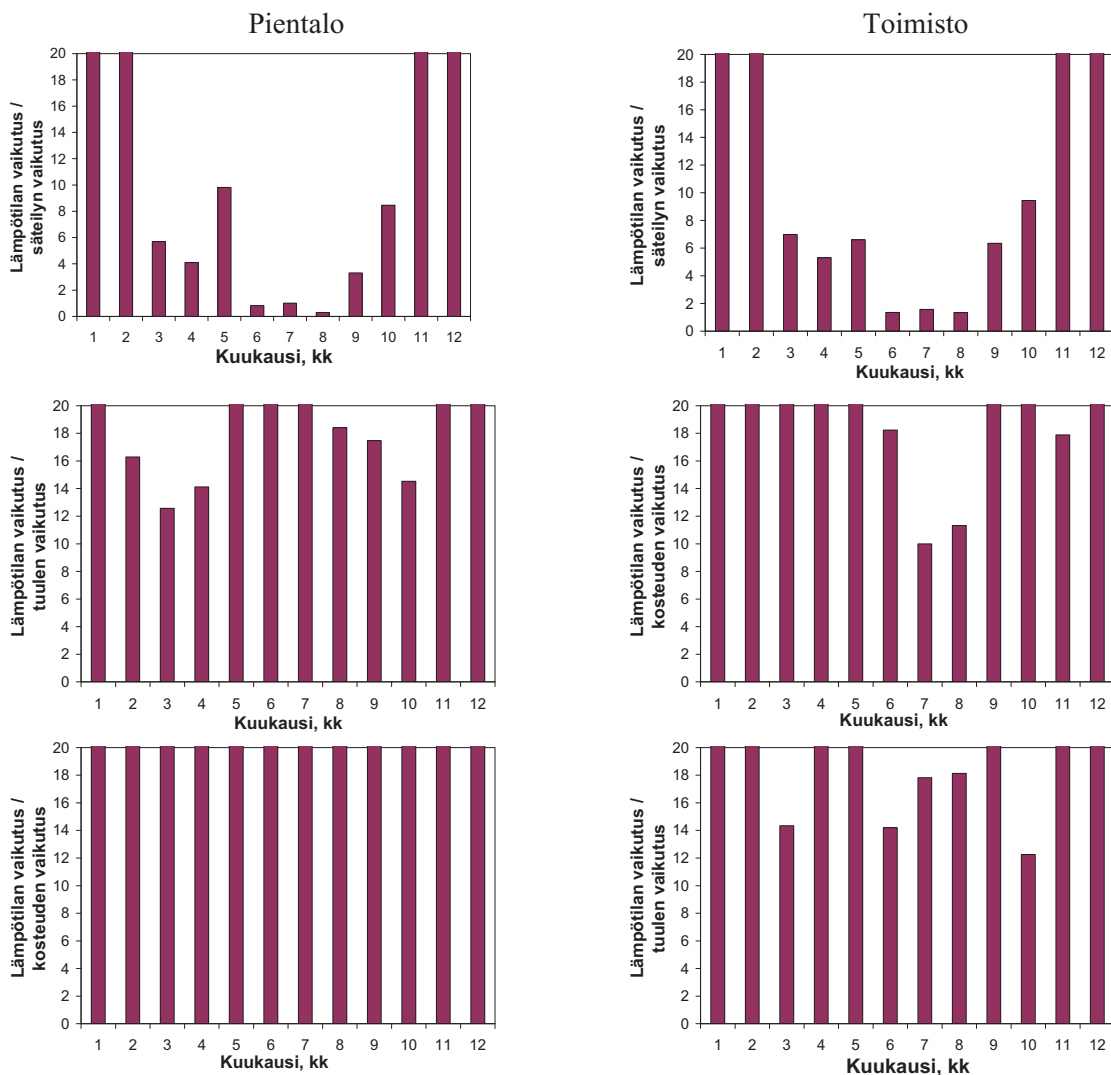
Kuva L5.1. Jyväskylässä sijaitsevan pientalon (vasen) ja toimiston (oikea) lämmitys- ja jäähdytys-energian nettotarve eri kuukausina, kun sääsuureiden arvoja ei ole muutettu.



Kuva L5.2. Ulkoilman lämpötilan poikkeuttamisen vaikutus kuukausittaisiin lämmitys- ja jäähdytys-energian nettotarpeisiin Jyväskylässä sijaitsevassa pientalossa (vasen) ja toimistossa (oikea) suhteessa vaikutuksiin, jotka aiheutuvat auringon kokonaissäteilyn (ylärivi), ilman kosteuden (keskimmäinen rivi) ja tuulen nopeuden (alarivi) muuttamisesta.



Kuva L5.3. Sodankylässä sijaitsevan pientalon (vasen) ja toimiston (oikea) lämmitys- ja jäähdytysenergian nettotarve eri kuukausina, kun sääsuureiden arvoja ei ole muutettu, vaan ne ovat havaintojen mukaisia.



Kuva L5.4. Ulkoilman lämpötilan poikkeuttamisen vaikutus kuukausittaisiin lämmitys- ja jäähdytysenergian nettotarpeisiin Sodankylässä sijaitsevassa pientalossa (vasen) ja toimistossa (oikea) suhteessa vaikutuksiin, jotka aiheutuvat auringon kokonaissäteilyn (yläriivi), ilman kosteuden (keskimmäinen rivi) ja tuulen nopeuden (alarivi) muuttamisesta.

Liite 6. Uusi testivuosi: lisätietoa

Vertailua vuosiin 1979 ja 1980–2009

Tunnittaisesta aineistosta lasketut sääsuureiden kuukausikeskiarvot ja -summat kullekin vyöhykkeelle on esitetty taulukoissa L6.1–L6.3. Taulukoista löytyvät myös vanhan testivuoden 1979 sekä keskimääräiset jakson 1980–2009 kuukausikeskiarvot. Taulukoiden arvoihin perustuva keskilämpötilojen ja lämmitystarvelukujen vertailu uuden ja vanhan testivuoden välillä sekä pitkän ajan keskiarvoon nähden esitetty kuvassa 6.3.

Taulukko L6.1. Sääsuureiden kuukausittaiset arvot vyöhykkeillä I–II (Vantaa) energialaskennan testivuotena (TRY2012), pitkän ajan keskiarvona (1980–2009) ja aikaisemmin käytössä olleena testivuotena 1979. 1 kWh = 3,6 MJ. Vähintään yhden keskihajonnan verran jakson 1980–2009 keskiarvosta poikkeavat arvot on lihavoitu.

	Keskilämpötila T, °C			Keskimääräinen suhteellinen kosteus RH, %			Auringon kokonais- säteilyenergia vaakatasolle G _{rad} , MJ/m ²			Normitukseen käytettävä lämmitys- tarveluku S ₁₇ , Kd		
	TRY2012	1980- 2009	1979	TRY2012	1980- 2009	1979	TRY2012	1980- 2009	1979	TRY2012	1980- 2009	1979
Tammikuu	-4,0	-4,9	-8,5	89	87	87	22,3	30,6	25,6	650	678	791
Helmikuu	-4,5	-5,7	-9,8	83	85	85	80,6	91,1	100,4	602	640	749
Maaliskuu	-2,6	-2,0	-1,7	82	80	82	231,5	233,3	198,7	607	589	579
Huhtikuu	4,5	4,0	1,8	67	70	70	431,6	396,7	373,3	354	375	456
Toukokuu	10,8	10,3	10,8	63	64	66	595,8	583,9	604,1	117	153	160
Kesäkuu	14,2	14,7	16,0	72	68	61	607,0	602,3	702,7	9	16	0
Heinäkuu	17,3	17,5	14,7	69	70	83	651,2	613,4	474,1	0	3	0
Elokuu	16,1	15,7	16,0	76	77	78	456,1	445,3	470,2	31	22	0
Syyskuu	10,5	10,7	9,7	79	81	82	295,2	259,6	259,6	161	159	193
Lokakuu	6,2	5,6	4,0	91	85	84	94,3	113,4	119,5	331	349	405
Marraskuu	0,5	0,4	1,4	89	88	91	29,2	35,6	24,8	495	498	468
Joulukuu	-2,2	-3,0	-3,9	87	89	87	15,8	16,6	16,9	595	619	646
Koko vuosi	5,6	5,3	4,3	79	79	80	3511	3422	3370	3952	4101	4447

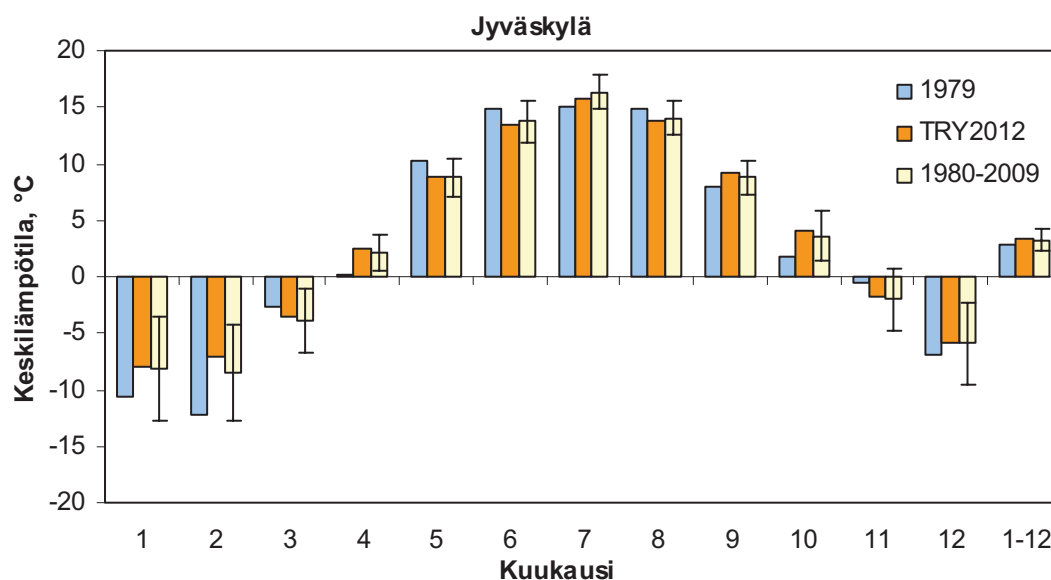
Taulukko L6.2. Sääsuureiden kuukausittaiset arvot vyöhykkeellä III (Jyväskylä) energialaskennan testivuotena (TRY2012), pitkän ajan keskiarvona (1980–2009) ja aikaisemmin käytössä olleena testivuotena 1979. 1 kWh = 3,6 MJ Vähintään yhden keskihajonnan verran jakson 1980–2009 keskiarvosta poikkeavat arvot on lihavoitu.

	Keskilämpötila T, °C			Keskimääräinen suhteellinen kosteus RH, %			Auringon kokonais- säteilyenergia vaakatasolle G _{rad} , MJ/m ²			Normitukseen käytettävä lämmitys- tarveluku S ₁₇ , Kd		
	TRY2012	1980- 2009	1979	TRY2012	1980- 2009	1979	TRY2012	1980- 2009	1979	TRY2012	1980- 2009	1979
Tammikuu	-8,0	-8,2	-10,6	88	89	90	19,4	22,7	20,5	775	780	856
Helmikuu	-7,1	-8,5	-12,2	90	87	86	72,4	81,0	83,9	675	721	816
Maaliskuu	-3,5	-4,0	-2,6	85	81	81	186,8	218,9	170,3	637	649	607
Huhtikuu	2,4	2,1	0,2	74	71	73	370,4	384,5	336,2	437	441	504
Toukokuu	8,8	8,8	10,3	61	65	64	617,0	544,7	529,6	210	211	183
Kesäkuu	13,4	13,8	14,9	66	68	66	572,8	564,1	617,0	60	40	8
Heinäkuu	15,8	16,3	15,0	73	72	79	569,5	563,4	498,2	22	11	0
Elokuu	13,8	14,0	14,8	81	79	81	410,0	408,6	419,0	78	58	18
Syyskuu	9,2	8,8	8,0	82	83	86	256,0	228,6	221,0	218	229	264
Lokakuu	4,1	3,6	1,7	87	88	87	91,1	89,3	95,8	401	414	473
Marraskuu	-1,8	-2,0	-0,6	94	91	94	26,3	26,3	19,8	563	570	528
Joulukuu	-5,9	-5,9	-6,9	89	91	89	11,5	10,1	10,1	711	711	741
Koko vuosi	3,4	3,2	2,8	81	80	81	3203	3142	3021	4787	4835	4997

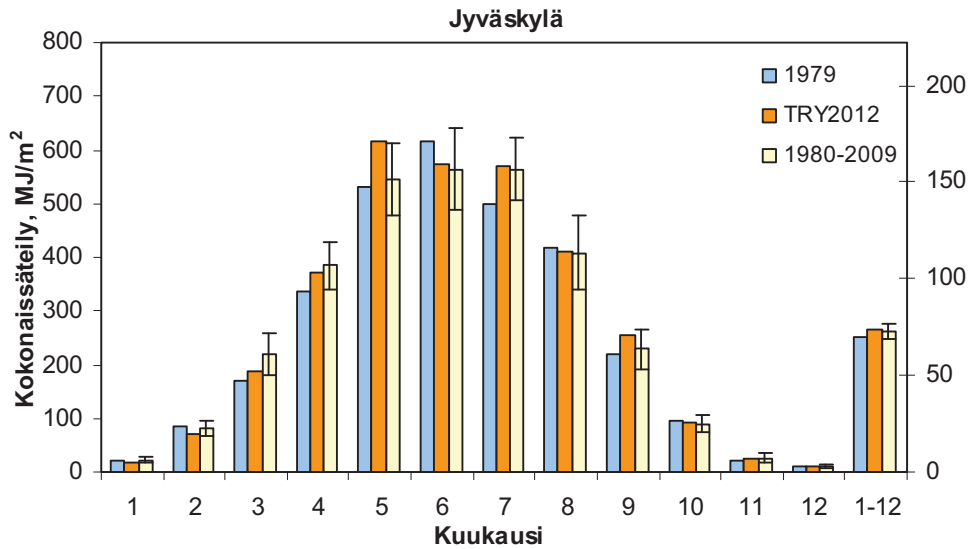
Taulukko L6.3. Sääsuureiden kuukausittaiset arvot vyöhykkeellä IV (Sodankylä), energialaskennan testivuotena (TRY2012), pitkän ajan keskiarvona (1980–2009) ja aikaisemmin käytössä olleena testivuotena 1979. 1 kWh = 3,6 MJ. Vähintään yhden keskihajonnan verran jakson 1980–2009 keskiarvosta poikkeavat arvot on lihavoitu.

	Keskilämpötila T, °C			Keskimääräinen suhteellinen kosteus RH, %			Auringon kokonais- säteilyenergia vaakatasolle G _{rad} , MJ/m ²			Normitukseen käytettävä lämmitys- tarveluku S ₁₇ , Kd		
	TRY2012	1980- 2009	1979	TRY2012	1980- 2009	1979	TRY2012	1980- 2009	1979	TRY2012	1980- 2009	1979
Tammikuu	-13,1	-13,6	-18,3	86	84	83	5,0	6,5	5,4	932	948	1094
Helmikuu	-12,6	-12,6	-14,9	79	83	83	49,0	51,5	40,0	830	838	893
Maaliskuu	-6,9	-7,5	-7,0	82	79	80	172,8	190,4	157,7	740	760	745
Huhtikuu	-1,6	-1,3	-3,6	66	71	74	435,6	388,4	351,7	557	550	619
Toukokuu	5,4	5,2	5,8	69	67	69	461,2	499,0	468,4	337	350	315
Kesäkuu	13,0	11,7	12,2	62	64	67	555,1	546,5	515,5	115	105	62
Heinäkuu	14,4	14,5	14,7	70	69	67	527,0	515,2	568,1	30	50	24
Elokuu	12,1	11,6	12,6	81	76	76	340,2	362,9	373,0	138	137	111
Syyskuu	6,6	6,2	6,3	82	82	85	229,3	182,2	174,6	303	316	323
Lokakuu	0,2	-0,0	-3,1	84	87	85	59,8	65,5	70,9	522	527	623
Marraskuu	-6,8	-7,1	-5,4	89	88	92	10,8	11,9	11,2	714	723	673
Joulukuu	-10,1	-11,8	-10,0	87	86	88	0,7	0,7	1,1	839	891	836
Koko vuosi	0,1	-0,4	-0,8	78	78	79	2847	2821	2737	6058	6196	6317

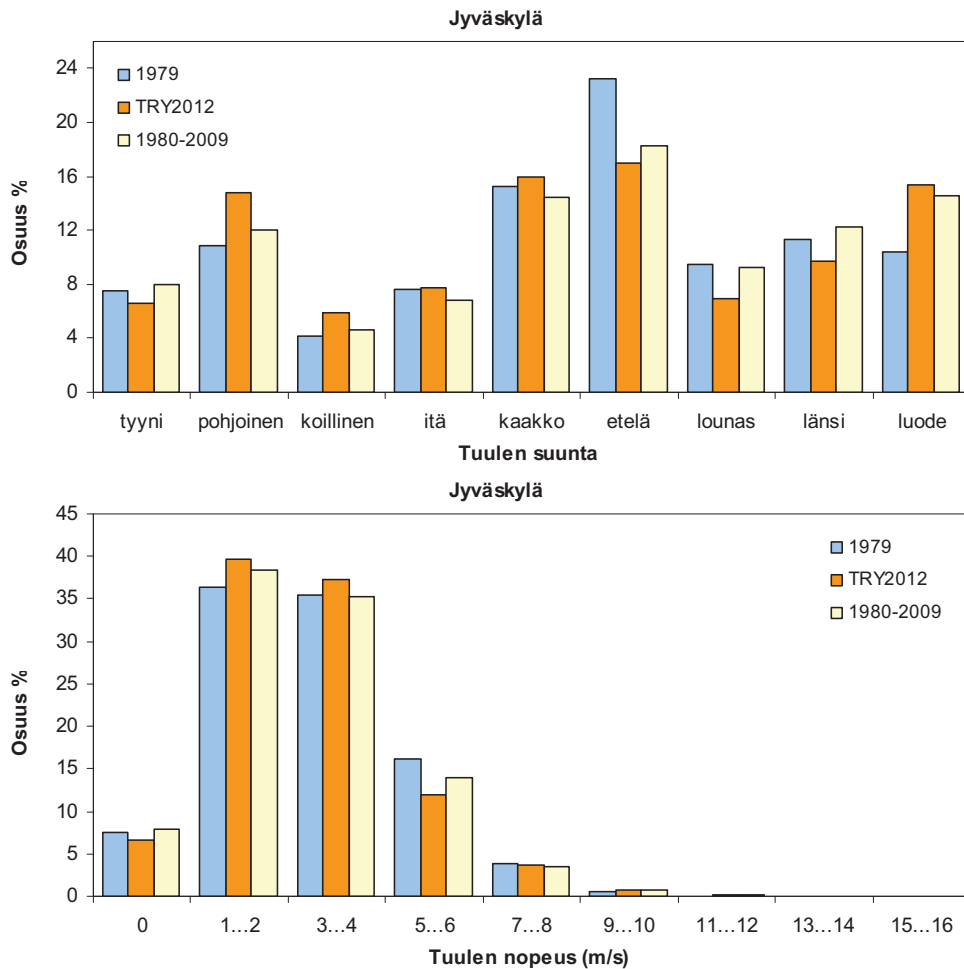
Uuden ja vanhan testivuoden mukaiset kuukausikeskilämpötilat, auringon kokonaissäteilyenergian kuukausisummat sekä tuulen nopeuden ja suunnan jakautuminen eri luokkiin lämpötilavyöhykkeillä III on esitetty kuvissa L6.1–L6.3. Vastaavat vertailut lämpötilavyöhykkeellä IV ovat nähtävissä kuvissa L6.4–L6.6.



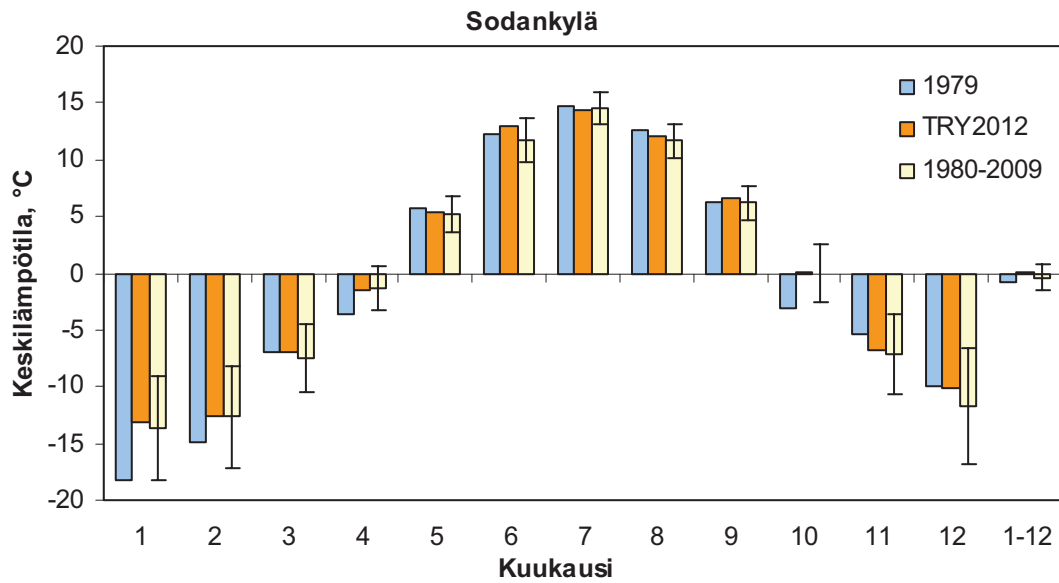
Kuva L6.1. Kuukauden keskilämpötilat Jyväskylän sääaineiston mukaan vyöhykkeellä III uutena (TRY2012) ja vanhana (1979) testivuotena. Lisäksi on esitetty jakson 1980–2009 pitkäaikaiset keskiarvot sekä yhden keskihajonnan suuruiset poikkeamat siitä kylmään ja lämpimään suuntaan. Vuoden keskilämpötila esitetään viimeisillä pylväillä ”1–12”.



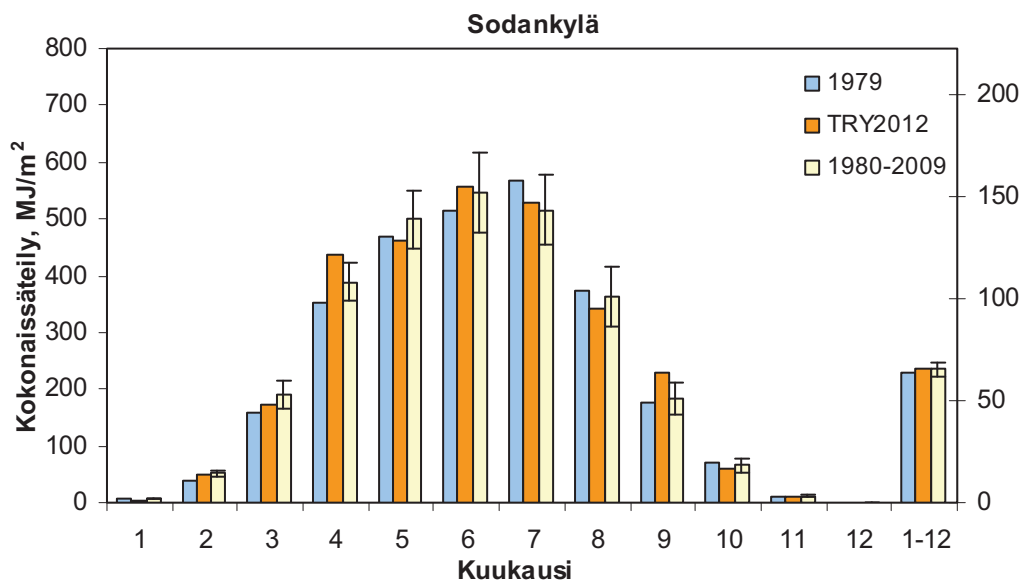
Kuva L6.2. Auringon säteilyenergian kokonaismäärä vaakatasolle kalenterikuukausittain Jyväskylän sääaineiston mukaan vyöhykkeellä III uutena (TRY2012) ja vanhana (1979) testivuotena. Lisäksi on esitetty jakson 1980–2009 pitkäaikaiset keskiarvot sekä yhden keskihajonnan suuruiset poikkeamat siitä valoisaan ja hämääseen suuntaan. Kalenterikuukausien keskimääräinen säteilysumma esitetään viimeisillä pylväillä ”1–12”. Oikeanpuoleisella pystyakselilla yksikkönä on kWh (1 kWh = 3,6 MJ).



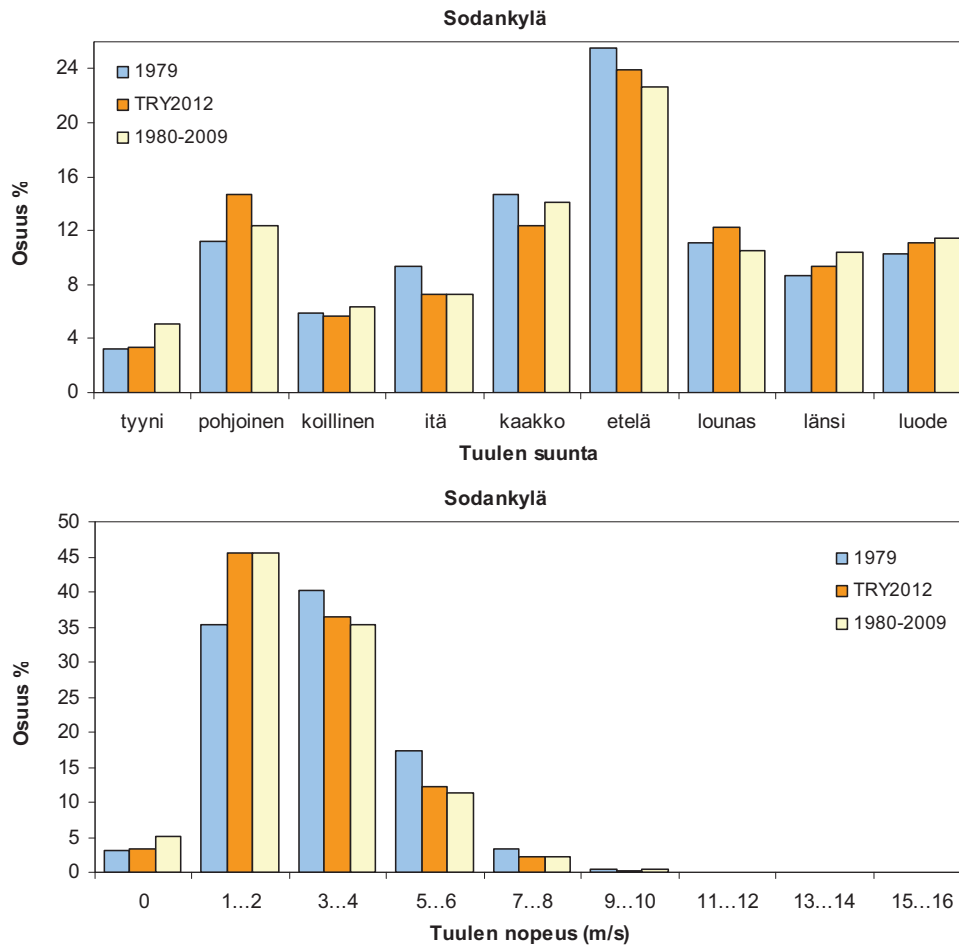
Kuva L6.3. Uuden testivuoden (TRY2012) mukainen tuulen suunnan jakautuminen eri ilmansuuntiin (yläkuva) ja nopeuden jakautuminen eri voimakkuusluokkiin (alakuva) vyöhykkeellä III (Jyväskylä) verrattuna vanhaan testivuoteen 1979 ja koko jaksoon 1980-2009.



Kuva L6.4. Kuukauden keskilämpötilat Sodankylän sääaineiston mukaan vyöhykkeellä IV uutena (TRY2012) ja vanhana (1979) testivuotena. Lisäksi on esitetty jakson 1980–2009 pitkäaikaiset keskiarvot sekä yhden keskihajonnan suuruiset poikkeamat siitä kylmään ja lämpimään suuntaan. Vuoden keskilämpötila esitetään viimeisillä pylväillä ”1–12”.



Kuva L6.5. Auringon säteilyenergian kokomais määrä vaakatasolle kalenterikuukausittain Sodankylän sääaineiston mukaan vyöhykkeellä IV uutena (TRY2012) ja vanhana (1979) testivuotena. Lisäksi on esitetty jakson 1980–2009 pitkäaikaiset keskiarvot sekä yhden keskihajonnan suuruiset poikkeamat siitä valoisaan ja hämärään suuntaan. Kalenterikuukausien keskimääräinen säteilysumma esitetään viimeisillä pylväillä ”1–12”. Oikeanpuoleisella pystyakselilla yksikkönä on kWh (1 kWh = 3,6 MJ).



Kuva L6.6. Uuden testivuoden (TRY2012 mukainen tuulen suunnan jakautuminen eri ilmansuuntiin (yläkuva) ja nopeuden jakautuminen eri voimakkuusluokkiin (alakuva) vyöhykkeellä IV (Sodankylä) sekä verrattuna vanhaan testivuoteen 1979 ja koko jaksoon 1980-2009.

Liite 8. Auringon kokonaissäteilyenergia erisuuntaisille pinnoille

Auringon kokonaissäteilyenergia pystysuuntaisille seinäpinnoille

Taulukko L8.1. Auringon kokonaissäteilyenergia eri ilmansuuntiin osoittaville pystypinnoille (P=pohjoinen, Ko=koillinen, jne) vyöhykkeillä I ja II (Vantaa) sekä ilmansuunnittain muunnoskerroin, jonka avulla vaakatasolle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia muunnetaan pystypinnalle tulevaksi energiaksi. Tulokset perustuvat testivuoden TRY2012 säteilyarvoihin.

Auringon kokonaissäteilyenergia eri ilmansuuntiin osoittaville pystypinnoille								
$G_{\text{säteily, pystypinta}}$, kWh/m ²								
Kuukausi	P	Ko	I	Ka	E	Lo	L	Lu
Tammikuu	5,0	5,0	5,9	11,1	14,1	11,1	5,8	5,0
Helmikuu	14,1	14,3	20,7	35,1	43,8	34,8	20,6	14,3
Maaliskuu	40,5	42,9	60,3	86,1	97,8	80,6	55,6	41,9
Huhtikuu	41,5	57,4	86,4	106,8	110,1	107,4	87,4	58,1
Toukokuu	57,4	85,2	119,8	128,3	118,0	122,9	112,5	79,9
Kesäkuu	70,7	91,4	116,5	114,1	102,9	115,5	118,7	93,0
Heinäkuu	66,5	95,4	127,0	128,5	117,5	133,9	130,6	95,1
Elokuu	47,8	67,9	98,8	111,6	102,7	98,4	86,0	63,0
Syyskuu	29,0	37,1	61,8	89,0	103,1	92,0	64,3	37,5
Lokakuu	13,2	13,5	19,3	30,2	38,1	31,9	20,5	13,6
Marraskuu	5,1	5,1	6,7	13,6	17,5	13,6	6,7	5,1
Joulukuu	3,2	3,2	3,8	9,3	12,5	9,8	4,1	3,2
Koko vuosi	393,9	518,3	726,9	863,6	878,0	851,7	712,7	509,7

Muunnoskerroin F_{suunta} , jonka avulla vaakatasolle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia muunnetaan erisuuntaisille pystypinnoille tulevaksi kokonaissäteilyenergiaksi

Kuukausi	P	Ko	I	Ka	E	Lo	L	Lu
Tammikuu	0,802	0,804	0,944	1,791	2,259	1,780	0,937	0,804
Helmikuu	0,631	0,640	0,927	1,571	1,957	1,558	0,919	0,639
Maaliskuu	0,630	0,667	0,938	1,340	1,521	1,254	0,865	0,651
Huhtikuu	0,346	0,478	0,721	0,891	0,918	0,896	0,729	0,485
Toukokuu	0,347	0,515	0,724	0,775	0,713	0,743	0,680	0,483
Kesäkuu	0,419	0,542	0,691	0,677	0,610	0,685	0,704	0,552
Heinäkuu	0,368	0,528	0,702	0,710	0,650	0,740	0,722	0,526
Elokuu	0,377	0,536	0,780	0,881	0,811	0,776	0,679	0,497
Syyskuu	0,354	0,452	0,754	1,085	1,257	1,122	0,784	0,457
Lokakuu	0,504	0,516	0,736	1,154	1,454	1,219	0,785	0,519
Marraskuu	0,635	0,635	0,830	1,675	2,159	1,673	0,828	0,635
Joulukuu	0,699	0,699	0,838	2,060	2,770	2,159	0,905	0,699
Koko vuosi	0,404	0,532	0,745	0,886	0,900	0,873	0,731	0,523

Taulukko L8.2. Auringon kokonaissäteilyenergia pystypinnoille eri ilmansuuntiin (P=pohjoinen, Ko=koillinen, jne) sekä muunnoskerroin, jolla vaakatasolle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia muunnetaan pystypinnalle tulevaksi kokonaissäteilyenergiaksi eri ilmansuunnissa vyöhykkeellä III (Jyväskylä). Tulokset perustuvat testivuoden TRY2012 säteilyarvoihin.

Auringon kokonaissäteilyenergia eri ilmansuuntiin osoittaville pystypinnoille								
$G_{\text{säteily, pystypinta}}$, kWh/m ²								
Kuukausi	P	Ko	I	Ka	E	Lo	L	Lu
Tammikuu	4,9	4,9	5,2	8,1	10,1	8,5	5,5	4,9
Helmikuu	15,2	15,2	22,6	39,9	49,9	39,1	22,1	15,3
Maaliskuu	39,4	40,4	49,6	66,3	78,5	71,3	53,9	41,3
Huhtikuu	44,0	56,2	81,2	100,6	103,0	96,4	78,1	55,7
Toukokuu	68,7	95,2	131,5	139,1	126,3	131,3	124,7	93,1
Kesäkuu	72,5	91,4	113,8	112,9	104,6	112,3	111,6	88,9
Heinäkuu	64,9	85,1	114,2	120,4	111,4	117,1	113,0	86,6
Elokuu	45,4	58,2	81,1	97,1	100,7	100,2	84,4	59,5
Syyskuu	26,3	33,2	56,4	82,2	94,1	80,6	54,7	32,5
Lokakuu	11,7	12,1	20,2	35,1	43,9	34,1	19,3	11,8
Marraskuu	4,9	4,9	6,4	11,9	15,3	11,9	6,5	4,9
Joulukuu	2,8	2,8	2,9	4,4	5,3	4,3	2,9	2,8
Koko vuosi	400,6	499,5	685,1	817,8	843,1	807,1	676,4	497,5

Muunnoskerroin F_{suunta} , jonka avulla vaakatasolle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia muunnetaan erisuuntaisille pystypinnoille tulevaksi kokonaissäteilyenergiaksi

Kuukausi	P	Ko	I	Ka	E	Lo	L	Lu
Tammikuu	0,899	0,899	0,956	1,485	1,864	1,564	1,004	0,899
Helmikuu	0,756	0,758	1,124	1,985	2,485	1,948	1,099	0,762
Maaliskuu	0,760	0,778	0,956	1,278	1,514	1,375	1,038	0,796
Huhtikuu	0,428	0,546	0,790	0,978	1,002	0,938	0,759	0,542
Toukokuu	0,401	0,555	0,767	0,812	0,737	0,766	0,728	0,544
Kesäkuu	0,456	0,574	0,715	0,710	0,657	0,706	0,701	0,559
Heinäkuu	0,410	0,538	0,722	0,761	0,704	0,740	0,714	0,547
Elokuu	0,399	0,511	0,712	0,853	0,884	0,880	0,741	0,523
Syyskuu	0,370	0,467	0,793	1,156	1,323	1,133	0,769	0,458
Lokakuu	0,460	0,477	0,797	1,384	1,730	1,345	0,762	0,467
Marraskuu	0,670	0,670	0,877	1,620	2,082	1,621	0,879	0,670
Joulukuu	0,861	0,861	0,904	1,349	1,642	1,336	0,901	0,861
Koko vuosi	0,450	0,561	0,770	0,919	0,947	0,907	0,760	0,559

Taulukko L8.3. Auringon kokonaissäteilyenergia pystypinnoille eri ilmansuuntiin (P=pohjoinen, Ko=koillinen, jne) sekä muunnoskerroin, jolla vaakatasolle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia muunnetaan pystypinnalle tulevaksi kokonaissäteilyenergiaksi eri ilmansuunnissa vyöhykkeellä IV (Sodankylä). Tulokset perustuvat testivuoden TRY2012 säteilyarvoihin.

Auringon kokonaissäteilyenergia eri ilmansuuntiin osoittaville pystypinnoille								
$G_{\text{säteily, pystypinta}}$, kWh/m ²								
Kuukausi	P	Ko	I	Ka	E	Lo	L	Lu
Tammikuu	1,2	1,2	1,2	1,5	1,8	1,5	1,2	1,2
Helmikuu	11,0	11,0	13,8	23,3	29,9	24,6	14,7	11,0
Maaliskuu	37,8	37,8	48,1	69,2	83,6	72,1	50,5	38,3
Huhtikuu	62,0	78,0	115,4	148,9	157,7	141,6	108,6	75,7
Toukokuu	61,0	81,1	104,0	103,9	92,5	95,7	93,0	73,5
Kesäkuu	77,2	92,9	113,2	109,4	100,7	109,3	113,1	92,8
Heinäkuu	67,1	85,9	111,0	115,3	108,6	108,6	101,6	79,3
Elokuu	39,4	49,9	67,9	80,9	86,1	88,0	74,3	51,9
Syyskuu	20,8	29,6	55,7	83,8	94,5	78,3	50,1	27,5
Lokakuu	9,4	9,5	14,5	26,1	32,4	25,0	13,9	9,6
Marraskuu	2,5	2,5	2,8	4,8	6,2	5,1	3,0	2,5
Joulukuu	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2
Koko vuosi	389,3	479,6	647,8	767,3	794,3	750,0	624,2	463,4

Muunnoskerroin F_{suunta} , jonka avulla vaakatasolle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia muunnetaan erisuuntaisille pystypinnoille tulevaksi kokonaissäteilyenergiaksi

Kuukausi	P	Ko	I	Ka	E	Lo	L	Lu
Tammikuu	0,836	0,836	0,857	1,093	1,307	1,100	0,857	0,836
Helmikuu	0,805	0,806	1,013	1,712	2,193	1,804	1,076	0,806
Maaliskuu	0,786	0,788	1,002	1,440	1,741	1,501	1,052	0,796
Huhtikuu	0,512	0,644	0,953	1,231	1,303	1,170	0,898	0,625
Toukokuu	0,476	0,633	0,812	0,811	0,722	0,747	0,726	0,574
Kesäkuu	0,500	0,602	0,734	0,709	0,653	0,708	0,734	0,602
Heinäkuu	0,458	0,587	0,758	0,788	0,741	0,741	0,694	0,542
Elokuu	0,416	0,528	0,718	0,855	0,911	0,931	0,786	0,549
Syyskuu	0,327	0,465	0,873	1,315	1,483	1,229	0,786	0,432
Lokakuu	0,566	0,575	0,875	1,572	1,953	1,510	0,835	0,580
Marraskuu	0,832	0,832	0,928	1,582	2,030	1,664	0,984	0,832
Joulukuu	0,818	0,818	0,818	1,091	1,318	1,091	0,818	0,818
Koko vuosi	0,492	0,606	0,819	0,970	1,004	0,948	0,789	0,586

Auringon kokonaissäteilyenergia 45 astetta kallistetulle pinnalle

Taulukko L8.4. Auringon kokonaissäteilyenergia 45 astetta kallistetulle pinnalle eri ilmansuuntiin suunnattuna (P=pohjoinen, Ko=koillinen, jne) sekä muunnoskerroin, jolla vaakatasolle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia muunnetaan 45 astetta kallistetulle pinnalle tulevaksi kokonaissäteilyenergiaksi eri ilmansuunnissa vyöhykkeillä I ja II (Vantaa). Tulokset perustuvat testivuoden TRY2012 säteilyarvoihin.

Auringon kokonaissäteilyenergia 45 astetta kallistetulle pinnalle eri ilmansuuntiin suunnattuna, kWh/m ²								
Kuukausi	P	Ko	I	Ka	E	Lo	L	Lu
Tammikuu	5,2	5,2	6,2	10,7	13,1	10,7	6,3	5,2
Helmikuu	15,4	15,8	23,5	37,3	44,3	36,8	22,6	15,6
Maaliskuu	38,1	44,4	66,3	94,9	106,7	90,3	63,1	42,5
Huhtikuu	51,5	73,7	108,8	143,4	154,9	142,7	114,3	72,8
Toukokuu	71,8	106,9	148,9	178,3	183,0	171,8	147,3	100,3
Kesäkuu	91,9	115,2	148,0	163,6	167,6	168,4	156,1	120,2
Heinäkuu	83,0	117,4	156,1	183,6	189,8	187,5	169,1	117,6
Elokuu	60,0	87,2	123,5	150,5	152,1	136,9	113,7	78,7
Syyskuu	34,8	47,1	76,2	110,8	126,9	112,3	81,3	46,9
Lokakuu	17,1	18,1	25,6	37,2	44,3	38,7	26,9	18,5
Marraskuu	6,2	6,2	8,0	14,0	17,0	13,9	8,1	6,2
Joulukuu	3,6	3,6	4,2	8,8	11,2	9,1	4,6	3,6
Koko vuosi	478,5	640,8	895,4	1133,2	1210,9	1119,1	913,3	628,1

Muunnoskerroin F_{suunta} , jolla vaakatasolle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia muunnetaan 45 astetta kallistetulle pinnalle tulevaksi kokonaissäteilyenergiaksi eri ilmansuunnissa

Kuukausi	P	Ko	I	Ka	E	Lo	L	Lu
Tammikuu	0,841	0,841	1,003	1,727	2,098	1,719	1,011	0,841
Helmikuu	0,687	0,706	1,053	1,668	1,982	1,645	1,011	0,698
Maaliskuu	0,592	0,691	1,032	1,476	1,659	1,405	0,981	0,661
Huhtikuu	0,430	0,615	0,908	1,197	1,293	1,190	0,953	0,607
Toukokuu	0,434	0,646	0,900	1,078	1,106	1,038	0,890	0,606
Kesäkuu	0,545	0,683	0,878	0,970	0,994	0,999	0,926	0,713
Heinäkuu	0,459	0,649	0,863	1,015	1,049	1,037	0,935	0,650
Elokuu	0,474	0,688	0,975	1,188	1,201	1,081	0,898	0,622
Syyskuu	0,425	0,575	0,929	1,352	1,547	1,370	0,991	0,572
Lokakuu	0,654	0,692	0,977	1,423	1,692	1,479	1,026	0,706
Marraskuu	0,768	0,768	0,985	1,722	2,102	1,719	0,994	0,768
Joulukuu	0,785	0,785	0,938	1,940	2,473	2,009	1,027	0,785
Koko vuosi	0,491	0,657	0,918	1,162	1,242	1,148	0,937	0,644

Taulukko L8.5. Auringon kokonaissäteilyenergia 45 astetta kallistetulle pinnalle eri ilmansuuntiin suunnattuna (P=pohjoinen, Ko=koillinen, jne) sekä muunnoskerroin, jolla vaakatasolle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia muunnetaan 45 astetta kallistetulle pinnalle tulevaksi kokonaissäteilyenergiaksi eri ilmansuunnissa vyöhykkeellä III (Jyväskylä). Tulokset perustuvat testivuoden TRY2012 säteilyarvoihin.

Auringon kokonaissäteilyenergia 45 astetta kallistetulle pinnalle eri ilmansuuntiin suunnattuna, kWh/m ²								
Kuukausi	P	Ko	I	Ka	E	Lo	L	Lu
Tammikuu	5,0	5,0	5,4	8,0	9,7	8,3	5,7	5,0
Helmikuu	13,6	13,7	22,6	37,9	45,7	37,4	20,9	13,7
Maaliskuu	36,2	40,0	52,3	72,5	84,5	76,2	58,4	41,0
Huhtikuu	51,1	69,1	99,8	129,0	137,2	123,8	97,9	66,0
Toukokuu	84,0	117,7	161,1	190,0	189,7	179,0	156,5	110,2
Kesäkuu	94,3	116,0	146,3	164,8	163,7	161,8	147,6	111,7
Heinäkuu	79,8	107,1	143,3	169,2	172,5	164,5	146,2	105,3
Elokuu	56,9	74,5	104,3	132,8	143,2	134,9	110,7	75,4
Syyskuu	31,7	41,8	68,8	100,3	113,5	98,6	69,5	40,7
Lokakuu	14,4	15,6	25,4	40,2	47,6	39,6	24,8	15,4
Marraskuu	5,8	5,8	7,5	12,2	14,9	12,2	7,4	5,8
Joulukuu	3,0	3,0	3,2	4,5	5,3	4,4	3,2	3,0
Koko vuosi	475,8	609,3	839,9	1061,4	1127,3	1040,7	848,8	593,3

Muunnoskerroin F_{suunta} , jolla vaakatasolle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia muunnetaan 45 astetta kallistetulle pinnalle tulevaksi kokonaissäteilyenergiaksi eri ilmansuunnissa

Kuukausi	P	Ko	I	Ka	E	Lo	L	Lu
Tammikuu	0,921	0,921	0,987	1,469	1,781	1,529	1,051	0,921
Helmikuu	0,676	0,683	1,123	1,886	2,277	1,861	1,040	0,683
Maaliskuu	0,697	0,771	1,008	1,398	1,628	1,470	1,126	0,791
Huhtikuu	0,497	0,671	0,970	1,254	1,334	1,204	0,952	0,642
Toukokuu	0,490	0,687	0,940	1,109	1,107	1,044	0,913	0,643
Kesäkuu	0,593	0,729	0,919	1,036	1,029	1,017	0,927	0,702
Heinäkuu	0,505	0,677	0,906	1,069	1,090	1,040	0,924	0,666
Elokuu	0,500	0,655	0,916	1,166	1,258	1,185	0,972	0,662
Syyskuu	0,446	0,588	0,968	1,411	1,596	1,387	0,978	0,572
Lokakuu	0,569	0,616	1,002	1,588	1,876	1,561	0,978	0,609
Marraskuu	0,783	0,783	1,015	1,663	2,031	1,665	1,003	0,783
Joulukuu	0,938	0,938	0,985	1,373	1,620	1,364	0,988	0,938
Koko vuosi	0,535	0,685	0,944	1,193	1,267	1,170	0,954	0,667

Taulukko L8.6. Auringon kokonaissäteilyenergia 45 astetta kallistetulle pinnalle eri ilmansuuntiin suunnattuna (P=pohjoinen, Ko=koillinen, jne) sekä muunnoskerroin, jolla vaakatasolle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia muunnetaan 45 astetta kallistetulle pinnalle tulevaksi kokonaissäteilyenergiaksi eri ilmansuunnissa vyöhykkeellä IV (Sodankylä). Tulokset perustuvat testivuoden TRY2012 säteilyarvoihin.

Auringon kokonaissäteilyenergia 45 astetta kallistetulle pinnalle eri ilmansuuntiin suunnattuna, kWh/m ²								
Kuukausi	P	Ko	I	Ka	E	Lo	L	Lu
Tammikuu	1,3	1,3	1,4	1,7	2,0	1,7	1,4	1,3
Helmikuu	11,0	11,0	14,0	22,7	28,0	23,7	15,2	11,1
Maaliskuu	35,1	37,3	50,5	72,4	85,1	75,0	54,1	38,2
Huhtikuu	58,9	83,3	125,0	168,2	181,8	159,5	121,6	77,3
Toukokuu	78,7	103,5	130,5	145,3	141,3	133,8	121,5	92,2
Kesäkuu	98,8	119,5	145,9	159,4	159,7	157,2	148,8	117,3
Heinäkuu	86,3	111,0	143,1	162,5	164,3	154,2	135,5	102,4
Elokuu	52,6	65,9	88,3	111,3	121,5	117,1	97,9	68,1
Syyskuu	25,9	36,8	66,2	97,2	109,3	93,1	61,8	34,8
Lokakuu	11,7	11,9	17,4	27,9	33,2	27,2	16,7	12,0
Marraskuu	2,7	2,7	3,0	4,7	5,8	4,9	3,2	2,7
Joulukuu	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
Koko vuosi	463,2	584,4	785,3	973,6	1032,1	947,6	777,7	557,5

Muunnoskerroin F_{suunta} , jolla vaakatasolle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia muunnetaan 45 astetta kallistetulle pinnalle tulevaksi kokonaissäteilyenergiaksi eri ilmansuunnissa								
Kuukausi	P	Ko	I	Ka	E	Lo	L	Lu
Tammikuu	0,950	0,950	0,971	1,200	1,393	1,207	0,979	0,950
Helmikuu	0,806	0,807	1,023	1,668	2,053	1,742	1,113	0,815
Maaliskuu	0,731	0,777	1,051	1,508	1,771	1,562	1,127	0,795
Huhtikuu	0,486	0,688	1,033	1,390	1,503	1,318	1,004	0,638
Toukokuu	0,615	0,808	1,019	1,134	1,103	1,045	0,949	0,720
Kesäkuu	0,640	0,775	0,946	1,034	1,036	1,019	0,965	0,761
Heinäkuu	0,589	0,758	0,977	1,110	1,122	1,053	0,925	0,699
Elokuu	0,556	0,697	0,934	1,177	1,285	1,238	1,036	0,720
Syyskuu	0,407	0,578	1,038	1,526	1,715	1,460	0,969	0,546
Lokakuu	0,707	0,719	1,051	1,685	1,999	1,642	1,005	0,725
Marraskuu	0,885	0,885	0,990	1,549	1,905	1,609	1,043	0,885
Joulukuu	0,955	0,955	0,955	1,182	1,364	1,182	0,955	0,955
Koko vuosi	0,586	0,739	0,993	1,231	1,305	1,198	0,983	0,705

Liite 9. Tutkimuksessa käytetyt ilmastomallit

Tutkimuksessa käytetyt maailmanlaajuiset ilmastomuutosmallit sekä niiden alkuperämaa ja laskentahilapisteikkö on esitetty taulukossa L9.1. Tarkempaa tietoa malleista kirjallisuusviitteinen on esitetty IPCC:n (2007) taulukossa 8.1. Mallitiedot on imuroitu kansainvälisestä CMIP3-tietopankista (Meehl et al., 2007).

Taulukko L9.1. Tutkimuksessa käytetyt maapallonlaajuiset ilmastomallit. Erotuskykyä kuvaavat Δx ja Δy kertovat mallin laskentapisteen vaakasuuntaisen välimatkan leveys- ja pituusasteina, ja L ilmaisee mallin ilmasektin laskentatasojen määrän. Eri kasvihuonekaasuskenaarioihin (A2 tai A1B) perustuvien mallikokeiden käyttö ilmastomuutosskenaarioiden laatimiseen eri sääsuureille on esitetty viidessä viimeisessä sarakkeessa (T = ilman lämpötila, σ_T = lämpötilan keskihajonta, G_{grad} = auringon kokonaissäteily, RH = suhteellinen kosteus, WS = tuulen nopeus ja suunta). Tähdellä merkityissä tapauksissa A2-skenaariota vastaavat arvot on skaalattu A1B- ja B1-mallikokeiden tuloksista.

Malli	Alkuperämaa	Δx	Δy	L	T	σ_T	G_{grad}	RH	WS
BCCR-BCM2.0	Norja	1.9	1.9	31	A2	A2	A2	A2	A2*
CGCM3.1(T47)	Kanada	2.8	2.8	31	A2	-	A2	A2	-
CGCM3.1(T63)	Kanada	1.9	1.9	31	A2*	A1B	A2*	A2*	A2*
CNRM-CM3	Ranska	1.9	1.9	45	A2	A2	A2	A2	A2*
CSIRO-MK3.0	Australia	1.9	1.9	18	A2	A2	-	-	A2*
ECHAM5/MPI-OM	Saksa	1.9	1.9	31	A2	A2	A2	A2	A2*
ECHO-G	Etelä-Korea/Saksa	3.9	3.9	19	A2	-	A2	-	-
GFDL-CM2.0	Yhdysvallat	2.0	2.5	24	A2	-	A2	-	-
GFDL-CM2.1	Yhdysvallat	2.0	2.5	24	A2	A2	A2	-	A2*
GISS-ER	Yhdysvallat	4.0	5.0	20	A2	-	A2	-	-
INM-CM3.0	Venäjä	4.0	5.0	21	A2	-	A2	A2	-
IPSL-CM4	Ranska	2.5	3.75	19	A2	A2	A2	-	A2*
MIROC3.2(HIRES)	Japani	1.1	1.1	56	A2*	A1B	A2*	-	A2*
MIROC3.2(MEDRES)	Japani	2.8	2.8	20	A2	-	A2	-	-
MRI-CGCM2.3.2	Japani	2.8	2.8	30	A2	A2	A2	-	A2*
NCAR-CCSM3	Yhdysvallat	1.4	1.4	26	A2	A2	A2	-	-
NCAR-PCM	Yhdysvallat	2.8	2.8	26	A2	-	A2	-	-
UKMO-HadCM3	Iso-Britannia	2.5	3.75	19	A2	-	A2	A2	-
UKMO-HadGEM1	Iso-Britannia	1.3	1.9	38	A2	-	A2	-	-
Yht					19	10	18	7	9

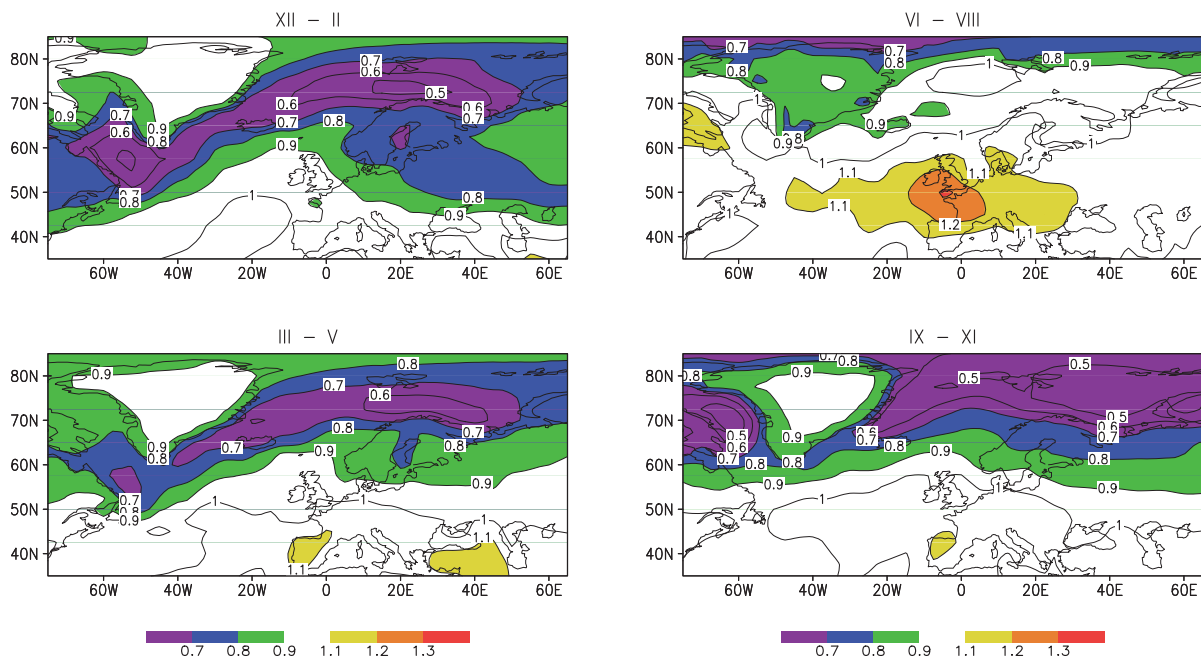
Liite 10. Tulevaisuuden testivuosisien laadinnan yksityiskohdat

Skenaariot vuosille 2050 ja 2100

Ilman lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja auringon säteilyn kokonaismäärän kuukausikeskiarvoille oli käytettävissä ilmastomallien simuloima jatkuva aikasarja vuoteen 2099 asti. Samoin kuin vuotta 2030, myös vuotta 2050 ympäröivää 30-vuotisjaksoa (2035–2064) kuvaavat muutokset saatiin laskettua suoraan tästä aikasarjasta. Viimeiselle jaksolle 2085–2114 laskettiin arvio ekstrapoloimalla jaksosten 1980–2009 ja 2070–2099 välistä muutosta lineaarisesti ajassa eteenpäin. Menettelyä voidaan perustella sillä, että A2-skenaariota toteutuessa maapallon keskilämpötila näyttäisi kohoavan vuoden 2100 tienoilla vähintäänkin samaa vauhtia kuin aikaisemmin 21. vuosisadalla (IPCC, 2007, kuva 10.4).

Lämpötilojen päivittäinen vaihtelevuus

Lämpötilan päivittäisten vaihtelujen voimakkuudesta ei ollut käytössä yhtenäistä mallitietojen aikasarjaa koko vuosisadan ajalta. Lämpötilavaihteluiden keskihajonnat laskettiin 10 mallin (liite 9) tulosten perusteella inter- tai ekstrapoloimalla jaksosten 1971–2000 ja 2081–2100 välistä muutosta (kuva L10.1) lineaarisesti ajan suhteen. Tunnittaisien lämpötilojen keskihajontojen suhteelliset muutokset on oletettu yhtä suuriksi kuin vastaavat vuorokautisten keskilämpötilojen hajontojen muutokset.



Kuva L10.1. Vuorokauden keskilämpötilojen keskihajonnan suhteellinen muutos eri vuodenaikoina siirryttäessä jaksosta 1971–2000 jaksoon 2081–2100. Alle yhden arvot tarkoittavat lämpötilavaihteluiden vaimenemista, yli yhden niiden voimistumista. XII-II: jouluhelmikuu, III-V: maaliskuu–toukokuu, VI-VII: kesä–elokuu, IX-XI: syys–marraskuu.

Kuukausikeskilämpötilojen ja lämpötilojen keskihajontojen muutokset määräytyivät suoraan kaavaan (7.1) sijoitettujen vastaavien mallien simuloimien muutosten perusteella. Kaavaa tutkimalla on helppo osoittaa, että menetelmän avulla saadaan lämpötilan vaihtelun jakaumasta sekä ensimmäinen että toinen momentti (keskiarvo ja keskihajonta) muunnettua vastaamaan

uutta ilmastoja täsmälleen mallien ennustamalla tavalla. Talvella ja välivuodenaikoina lämpötilojen hajonta pienenee (kuva L10.1), eli suhteessa alhaisia lämpötiloja nostetaan enemmän kuin leudompia. Paitsi että sääoloiltaan kylmimmät päivät lämpenevät eniten, näin myös lämpötilan vuorokautinen vaihtelu vaimenee. Keväällä kuukauden loppupuoli on tyypillisesti alkupuolta lämpöisempi, joten loppukuusta lämpötilaa on kohotettu vähemmän. Vastaavasti syksyllä lämpeneminen on pienintä kuukauden alkupuolella. Tällainen muutosten kuukaudensisäinen jakauma istuu hyvin yhteen sen kanssa, että kuukausikeskilämpötilat nousevat kesäpuolella vuotta vähemmän kuin talvivuosipuoliskolla.

Lämpötilan muunnosalgoritmia käytettäessä oletetaan implisiittisesti, että kaavassa (7.1) esiintyvä testivuoden kuukausikeskilämpötila \bar{T}_{hav} ei poikkea suuresti nykyisen ilmaston klimatologisesta kuukausikeskiarvosta. Koska testivuosi TRY2012 on koottu havainnoista sääoloiltaan mahdollisimman tyypilliseksi, tämä oletamus pätee kohtalaisen hyvin (vrt. kuvat 6.2, L6.1 ja L6.4). Jos algoritmia haluttaisiin soveltaa keskimääräisoloja selvästi kylmemmän tai lämpimämmän kuukauden muuntamiseen tulevaan ilmastoon, suureen \bar{T}_{hav} arvona olisi käytettävä ko. kuukauden keskilämpötilan sijasta koko 30-vuotisjakson vastaavaa kuukausikeskilämpötilaa.

Suurin ongelma lämpötiloja muunnettaessa liittyy nolla-asteen lähellä oleviin lämpötiloihin. Havaintojen mukaan tällaisia lämpötiloja esiintyy vuoden mittaan jonkin verran yleisemmin kuin useita asteita lämpimän tai pakkasen puolella olevia (kuvat 9.3, L12.5–L12.6). Fysikaalisen intuition perusteella voitaisiin odottaa jonkinmoista frekvenssihuippua nolla-asteen vaiheille myös tulevaisuuden ilmastossa. Kaavaa (7.1) sovellettaessa tämä huippu kuitenkin siirtyy lämpöasteiden puolelle.

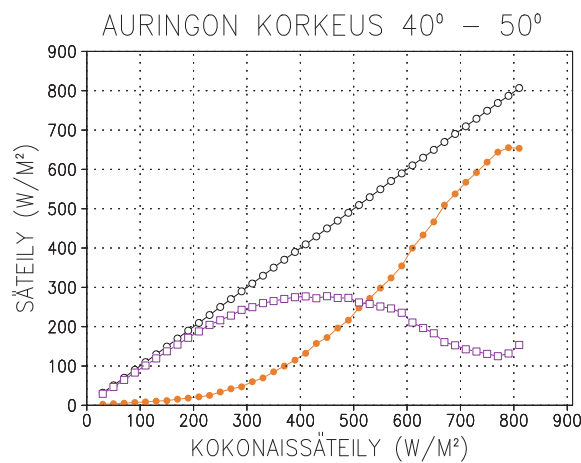
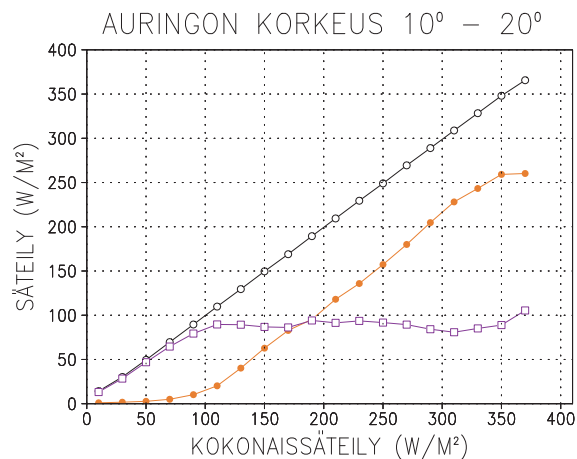
Auringon suora ja hajasäteily

Sodankylässä, Jyväskylässä ja Vantaalla vuosina 1980–2009 tehtyjen säteilymittauksien (yhteensä yli 260 000 mittauseroa) perusteella tutkittiin vaakapinnalle saapuvan suoran ja hajasäteilyn riippuvuutta kokonaissäteilyn määrästä ja auringon korkeuskulmasta. Ensin yhdistettiin kolmen havaintoaseman mittaustiedot ja ryhmiteltiin ne auringon korkeuskulman mukaan, minkä jälkeen suoran ja hajasäteilyn arvot luokiteltiin kokonaissäteilyn perusteella 20 W m^{-2} välein ja otettiin kussakin luokassa keskiarvo molemmista säteilysuureista. Yhteys säteilysuureiden välillä on esitetty kuvassa L10.2 10–20 asteen ja 40–50 asteen auringon korkeuskulmille. Nähdään, että jos kokonaissäteilyn määrä on auringon korkeuskulma huomioon ottaen suuri, suoran säteilyn osuus on huomattava. Jos taas säteilyä tulee vähän, hajasäteilyn osuus on suuri. Tällöin voidaan ounastella, että sää on pilvinen. Kokonaissäteilyn kasvaessa hajasäteilyn määrä kasvaa, kunnes se saavuttaa ”kyllästystasonsa”, minkä jälkeen hajasäteily ei enää lisääny, vaan rajan ylittävä säteily lankeaa suorana säteilyä.

Tätä havaintoihin perustuvaa riippuvuutta käytettiin hyväksi arvioitaessa suoran ja hajasäteilyn määriä tulevaisuuden ilmastossa. Periaatteena oli, että jos nykyisen ilmaston testivuoden säätiedoissa on esiintynyt suoraa säteilyä, kokonaissäteilyn muutos annettiin vaikuttaa ensisijaisesti siihen ja vasta toissijaisesti hajasäteilyyn. Tämän perusteella säteilysuureiden muutos kunakin ajanhetkenä laskettiin seuraavasti:

1. Katsottiin ensin, kuinka paljon mallit keskimäärin ennustavat säteilyn vähentyvän kullakin paikkakunnalla eri kuukausina. Jokaisella ajanhetkellä kokonaissäteilyä *Grad* pienennettiin tällä prosenttiluvulla.
2. Laskettiin, kuinka suurta absoluuttista säteilyn vähennystä $\Delta Grad$ edellisen kohdan prosenttimuutos merkitsi kunakin ajanhetkenä.

3. Mikäli suoraa säteilyä oli tarjolla, sen määrää vähennettiin $\Delta Grad$:n verran. Mikäli suora säteily ei riittänyt vähennyksen toteuttamiseen, loput rokotettiin hajasäteilystä.
4. Mikäli suoraa säteilyä ei ollut saatu lainkaan, $\Delta Grad$ otettiin kokonaan hajasäteilystä *RDIF*.
5. Lähinnä joinakin kesän ja alkusyksyn kuukausina mallit ennustivat säteilyn hiukan lisääntyvän. Säteilyn lisä sijoitettiin tällöin kokonaisuudessaan suoraan säteilyyn, paitsi suoran säteilyn ollessa nolla hajasäteilyyn.
6. Lopuksi havainnoista laskettua aurinkoon nähden kohtisuoralle pinnalle lankeavaa säteilyä *RDIF* lisättiin/vähennettiin samassa suhteessa kuin vaakasuoralle pinnalle saatavan suoran säteilyn määrä oli laskelman mukaan muuttunut.



Kuva L10.2. Suoran (oranssi käyrä) ja hajasäteilyn (violetti käyrä) havaittu riippuvuus kokonaissäteilyn (musta käyrä) määrästä auringon korkeuskulman ollessa $10-20$ astetta (yläkuva) ja $40-50$ astetta (alakuva). Riippuvuus on saatu yhdistelemällä Vantaan, Jyväskylän ja Sodankylän säteilyhavainnot vuosilta 1980–2009 ja ryhmittelemällä ne auringon korkeuskulman mukaan. Sen jälkeen säteilytiedot on luokiteltu kokonaissäteilyn perusteella $20 W/m^2$ välein laskettuihin luokkiin ja otettu kussakin luokassa keskiarvo molemmista säteilysuureista. Huomaa kuvien eri pystyasteikot ja se, että säähavainnoissa suora säteily mitataan vaakasuoralta pinnalta.

Siitä, miten auringon säteilyn määrän vaihtelevaisuus ajanhetkestä toiseen mahdollisesti muuttuu, ei ollut mallien antamaa tietoa. Siksi auringon säteilyn kokonaismäärää pienennettiin (paitsi joinakin kesän ja alkusyksyn kuukausina hiukan lisättiin) samalla prosentiosuu-

della kaikkina kuukauden päivinä ja vähennys otettiin aina ensisijaisesti suorasta säteilystä, milloin sitä oli tarjolla. Tätä “juustohöylämäisyyttä” voidaan pitää menetelmän jonkinmoisena heikkoutena. Niinä kuukausina joina säteily vähentyy, kaikkein kirkkaimmat, täysin aurinkoiset päivät katosivat tämän laskutavan tuloksena tyystin. Algoritmi saattaa vähentää suoraa säteilyä liiankin voimakkaasti ja hajasäteilyä vastaavasti liian vähän. Jos muunnos olisi voitu toteuttaa toisin, vähentämällä säteilyä vain osalta ajasta mutta silloin vastaavasti rajummin, hajasäteilyn osuus vähenemästä olisi ollut isompi.

Toisaalta kesäaikaan, jolloin auringon säteilyn lämmittävä vaikutus on suurimmillaan (kuva 5.11), säteilyn muutokset olivat mallien mukaan varsin pieniä (kuva L11.3). Laskentamenetelmään liittyvät epävarmuustekijät vaikuttavat tuloksiin suhteellisesti eniten talvella, jolloin auringon säteilyä saadaan joka tapauksessa vähän, niin nykyisessä kuin tulevassa ilmastossakin.

Säteilyn muunnosalgoritmi on toisaalta siinä mielessä turvallinen, että se ei synnytä jakamaan mitään uusia keinotekoisia vaihteluita.

Suhteellinen kosteus

Suhteelliset kosteudet lämmenneessä ilmastossa laskettiin seuraavasti:

Vaihe 1: Lasketaan, paljonko kuukauden keskimääräistä suhteellista kosteutta pitää muuttaa, jotta se kuvaisi uutta lämmennyttä ilmastoa.

1. Katsotaan ensin, miten suuri kyllästysvajausta (pakkasasteilla jään suhteen) saatiin seitsemän mallin ennustusten keskiarvona vuosia 1995 (1980–2009), 2030, 2050 ja 2100 ympäröivinä 30-vuotisjaksoina (viimeinen ajan suhteen ekstrapoloimalla); erikseen kunakin kuukautena kunkin havaintoaseman kohdalla.
2. Havainnoista laskettua kuukausittaista klimatologista, 30 vuoden (1971–2000) keskiarvona saatua kyllästysvajausta pienennettiin tai kasvatettiin samassa suhteessa kuin mitä mallit ennustivat.
3. Näin saatu kyllästysvajauksen muutos kertoo, kun etumerkki vaihdetaan, kuinka paljon kuukauden keskimääräisen suhteellisen kosteuden tulee mallien mielestä nousta tai pienentyä siirryttäessä uuteen ilmastoon.

Esimerkki: Tammikuussa Sodankylässä keskimääräinen (v. 1971–2000) havaittu suhteellinen kosteus on 84 % (Drebs ym., 2002). Tammikuun keskilämpötilaa (-14,1 °C) vastaava kyllästyskosteus jään suhteen on 87,2 %, joten nykyisessä ilmastossa kyllästysvajausta on 3,2 %-yksikköä. Mallien simuloimana vastaava nykyilmaston suhteellinen kosteus (jään suhteen) on 85,88%, mistä saadaan kyllästysvajaukseksi 14,12%-yksikköä. Vuoteen 2100 mennessä mallit ennustavat suhteellisen kosteuden nousua 89,31%:iin, joten kosteusvajausta pieneni arvoon 10,69 eli tekijällä 0,76. Tämä vastaisi havainnoissa tammikuun kosteusvajauksen vähenemistä arvoon $0,76 \cdot 3,2 = 2,4$ %-yksikköä ja samalla keskimääräisen suhteellisen kosteuden kasvua $(1 - 0,76) \cdot 3,2$ eli 0,8 prosenttiyksiköllä.

Vaihe 2: Määrätään uudet tunnitteiset suhteellisen kosteuden arvot.

4. Kohotetaan testivuoden TYR2012 tunnitteisia suhteellisia kosteuksia funktion

$$\Delta r = \varepsilon r (r_{\max} - r) \quad (\text{L10.1})$$

mukaisesti, missä r on havaittu suhteellinen kosteus ja r_{\max} kyllästystilaa vastaava

kosteus (lämpöasteilla 100% ja pakkasella kyllästystila jään suhteen). Itseisarvoltaan pienen kertoimen ε etumerkki riippuu siitä, ennustavatko mallit kosteuden lisääntyvän vai vähentyvän.

5. Toistetaan menettelyä iteratiivisesti, kunnes kuukauden keskimääräinen suhteellinen kosteus on noussut tai pudonnut prosenttiyksikön kymmenestuhannesosan tarkkuudella niin paljon kuin mallit ennustavat.
6. Lopuksi sopeutetaan veden suhteen lasketut tunnitaiset kosteusarvot vastaamaan uusia hetkellisiä lämpötiloja niin, että suhteellinen kosteus jään suhteen on edelleen se mitä iteroinnin tuloksena saatiin. Tätä korjausta tarvitaan vain, kun havaittu lämpötila on lähtötilanteessa ollut pakkasen puolella.

Alhaisissa lämpötiloissa kosteuden mittaaminen on varsin epätarkkaa, ja tällöin mitatuissa arvoissa saattaa olla virhettä usean prosenttiyksikön verran. Mittausepätarckkuuksien vuoksi osa talvikuukausien mittausarvoista näyttää ylikyllästystä jään suhteen. Lämmennyttyä ilmastoa kuvaavissa kosteustiedoissa tällaiset näennäiset ylikyllästystilat on korjattu vastaamaan kyllästystilaa jään suhteen.

Kun kosteudet muunnetaan vastaamaan tulevaa ilmastoa, havaintoihin liittyvät epävarmuustekijät luonnollisesti seuraavat mukana. Ainoastaan jääpinnan suhteen ylikyllästetyt tilanteet siis pystyttiin korjaamaan. Toisaalta hyvin alhaisissa lämpötiloissa ilman absoluuttinen kosteus on aina äärimmäisen alhainen, eikä suhteellisen kosteuden tarkalla arvolla ole suurta käytännön merkitystä. Lämpimällä säällä kosteusmittaukset ovat paljon tarkempia.

Liitteestä 11 ilmenee, että vuoteen 2100 tultaessa suhteelliset kosteudet ovat joinakin loppusyksyn ja talven kuukausina kauttaaltaan hyvin korkeita, lähellä kyllästystilaa. Tällaiseen tilaan voidaan päätyä, jos kyseinen kuukausi on ollut jo testivuoden tilastoissa ilmastolliseen keskiarvoon nähden kostea, ja tämän päälle on vielä tullut mallien ennustama, keskimääräisiä tulevia ilmasto-oloja vastaava kosteuden lisäys. Teoriassa kosteuden muunnoksen algoritmia olisikin perustellumpaa soveltaa pitkään, esimerkiksi 30 vuoden mittaiseen aineistoon. Tällöin alhaisen kosteuden talvikuukausia kostutettaisiin enemmän kuin sääoloiltaan jo lähtötilanteessa runsaskosteudellisia. Nyt kuitenkin muunnettavana oli vain yksi kappale kutakin kalenterikuukautta, joten tuloksessa voi olla mukana jonkin verran tästä epätyypillisyydestä johtuvaa harhaa.

Talvipuolella vuotta suuri osa ilmoitetusta suhteellisen kosteuden noususta on näennäistä. Näin siksi, että virallisten säähavainto-ohjeitten mukaan suhteellinen kosteus täytyy pakkas-säälläkin ilmoittaa nestemäisen veden kyllästystilan suhteen. Jään suhteen laskettu suhteellinen kosteus on korkeampi kuin alijäähtyneen nestemäisen veden suhteen laskettu, ja ero on sitä isompi mitä kovempi pakkasen vallitsee. Kun lämpötilaa nostetaan, alijäähtyneen veden suhteen laskettu suhteellinen kosteus kohoaa näin ollen triviaalisti, vaikka suhteellista kosteutta jään suhteen ei muutettaisi lainkaan. Tämän muutoksen päälle tulee vielä mallien ennustama kosteuden lisääntyminen. Esimerkiksi Sodankylässä algoritmilta syötetty mallituloksiin perustuva kosteuden lisäys v. 2100 oli helmikuussa vain 1,3 %-yksikköä, mutta kun otettiin huomioon myös lämpötilan noususta johtuva osuus, kosteuden kuukausikeskiarvo nousikin kokonaista 7,1 %-yksikköä. Pakkasettomana vuodenaikana algoritmi sen sijaan antaa kosteuden kuukausikeskiarvolle yksi yhteen mallituloksia vastaavan muutoksen.

Tuuli

Havaintoihin perustuva 10 minuutin keskituuli voidaan esittää komponenttimuodossa:

$$u_{hav}(t) = V_{hav}(t) \cdot \cos \alpha(t) \quad (\text{L10.2a})$$

$$v_{hav}(t) = V_{hav}(t) \cdot \sin \alpha(t) \quad (\text{L10.2b})$$

missä

$$V_{hav} = \sqrt{u_{hav}^2 + v_{hav}^2} \quad (\text{L10.3})$$

ja u ja v ovat tuulivektorin länsi- ja eteläkomponentit (esimerkiksi luoteistuulella $u > 0$ ja $v < 0$), V on skalaarinen tuulennopeus ja $\alpha = 270^\circ - \varphi$, missä φ on meteorologisissa havainnoissa käytetty tuulen suuntakulma (90° itätuulelle, 180° etelätuulelle, 270° länsituulelle ja 360° pohjoistuulelle, jne.).

Tulevan ilmaston tuulien arvioimiseksi näihin tunnin välein komponenttimuodossa esitettyihin tuuliin lisättiin ensin mallien ennustama muutoksen kuukausikeskiarvo kyseisessä komponentissa:

$$u^*(t) = u_{hav}(t) + \Delta \bar{u} \quad (\text{L10.4a})$$

$$v^*(t) = v_{hav}(t) + \Delta \bar{v} \quad (\text{L10.4b})$$

Koska tuulista ei ollut käytössä yhtenäistä mallitietojen aikasarjaa koko vuosisadan ajalta, muutokset laskettiin interpoloimalla (vuosille 2030 ja 2050) tai ekstrapoloimalla (vuodelle 2100) jaksojen 1971–2000 ja 2081–2100 välistä muutosta lineaarisesti ajan suhteen.

Jotta kuukauden keskimääräinen skalaarinen tuulen nopeus muuttuisi täsmälleen mallien ennustamalla tavalla, näitä arvoja jouduttiin vielä korjaamaan nopeuden muutosta kuvaavalla kertoimella:

$$u_{ske} = u^* \frac{\bar{V}_{hav} + \Delta \bar{V}}{\bar{V}^*} \quad (\text{L10.5a})$$

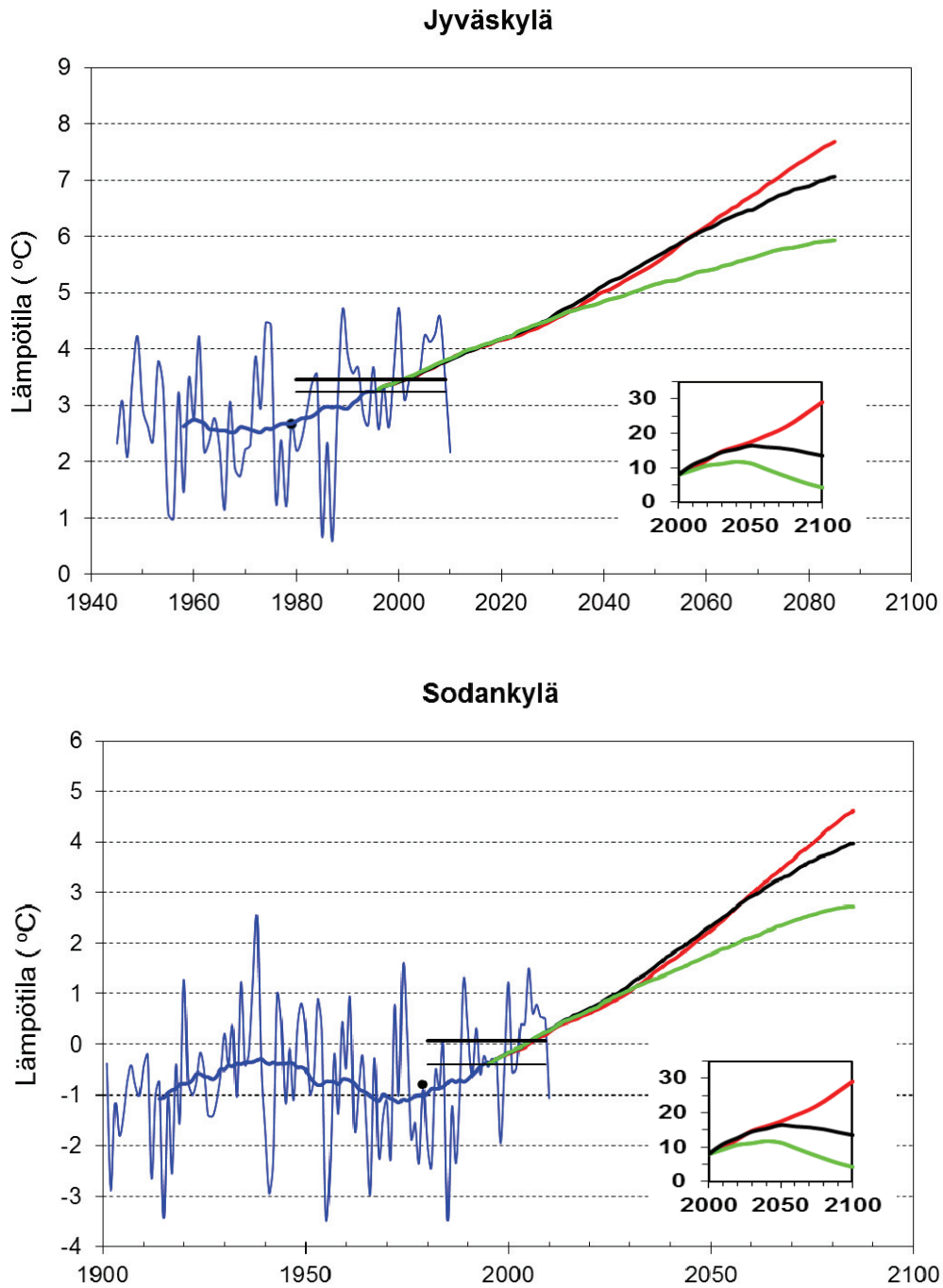
$$v_{ske} = v^* \frac{\bar{V}_{hav} + \Delta \bar{V}}{\bar{V}^*} \quad (\text{L10.5b})$$

Tuulisuureitten muutokset $\Delta \bar{u}$, $\Delta \bar{v}$ ja $\Delta \bar{V}$ perustuvat 9 mallin tuloksiin. Näissä malliajoissa pakotteena oli käytetty A1B-kasvihuonekaasuskenaariota, mutta mallien ennustamat muutokset skaalattiin simuloitujen maapallon keskilämpötilojen muutosten perusteella vastaamaan A2-skenaariota (Ruosteenojan ym., 2007, käyttämä menetelmä yksinkertaistettuna).

Algoritmi muuntaa kuukauden keskimääräisen tuulennopeuden täsmälleen kuten mallit ennustavat ja suuntien jakaumankin ainakin kvalitatiivisesti järkevästi.

Alkuperäiset tuulihavainnot on esitetty kokonaislukuina yhden sekuntimetrin (nopeus) ja 10 asteen (suunta) tarkkuudella. Tämä pyöristysvirhe siirtyy myös muunnettua ilmastoa kuvaaviin tietoihin, vaikka arvot onkin näennäisesti esitetty tiedostoissa tätä suuremmalla tarkkuudella. Kun tarkastellaan suurta joukkoa tuulihavainnoja ja tutkitaan siitä tilastollisia ominaisuuksia, pyöristysvirheen vaikutus kuitenkin katoaa.

Liite 11. Ilmaston muutokset: täydentävää tietoa

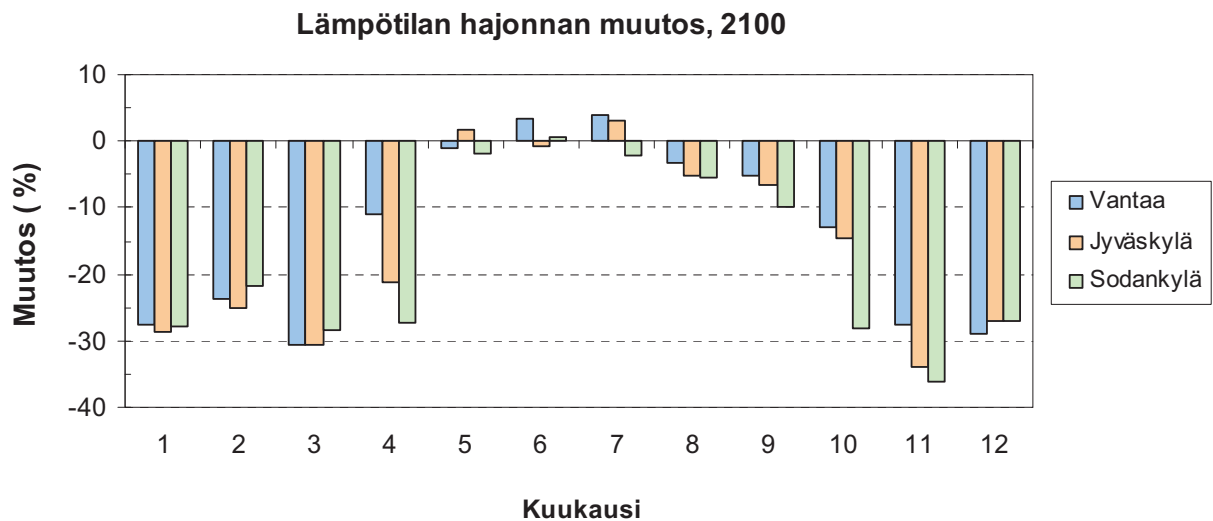


Kuva L11.1. Vuoden keskilämpötila Jyväskylässä ja Sodankylässä. Havaintojen perustuvia yksittäisten vuosien arvoja esittää ohut sininen käyrä. Havaintoihin sovitettu 30 vuoden liukuva keskiarvo on näytetty paksulla sinisellä käyrällä. Tämän käyrän etenemiselle tulevaisuudessa on esitetty kolme vaihtoehtoista skenaariota, jotka perustuvat 19 ilmastomallin tulosten keskiarvoina saatuihin lämpötilojen muutoksiin havaintoasemaa lähinnä olevassa laskentahilapisteessä. Käytetyt kolme kasvihuonekaasuskenaariota ovat ns. SRES A2 (punainen), A1B (musta) ja B1 (vihreä). Näitä skenaarioita vastaavat hiilidioksidin päästöt (yksikkönä GtC/v) on esitetty oikean alareunan pikkukuvassa. Mustat janat jakson 1980-2009 kohdalla esittävät tämän jakson keskiarvoa (ohut viiva) sekä uuden testivuoden TRY2012 mukaista keskiarvoa (paksu viiva). Musta piste esittää vanhan testivuoden 1979 mukaista keskilämpötilaa. Huomaa ylä- ja alakuvan vaak akselin ero.

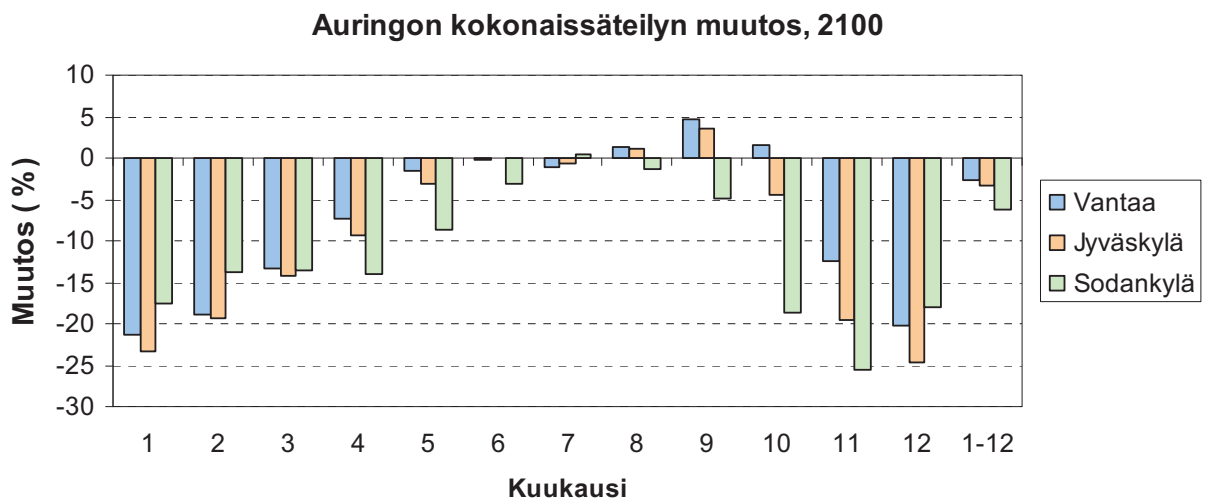
Pitkän aikavälin trendit

Kuva L11.1 esittää 19 ilmastonmallin keskiarvona saatu arviota siitä, miten vuoden keskilämpötila (30 vuoden liukuvana keskiarvona) kohoaa Jyväskylässä ja Sodankylässä tämän vuosisadan aikana; vastaava havaintoihin perustuva tasoitettu käyrä viime vuosisadalle ja yksittäisten menneiden vuosien havaintoarvot ovat myös nähtävillä. Samanlainen aikasarja Vantaalle on esitetty kuvassa 8.1. Käytetyt kolme kasvihuonekaasuskenaariota ovat A2 (isot päästöt), A1B (keskinkertaiset päästöt) ja B1 (pienet päästöt), joita vastaavat hiilidioksidin päästöskenaariot on myös näytetty kuvassa L11.1.

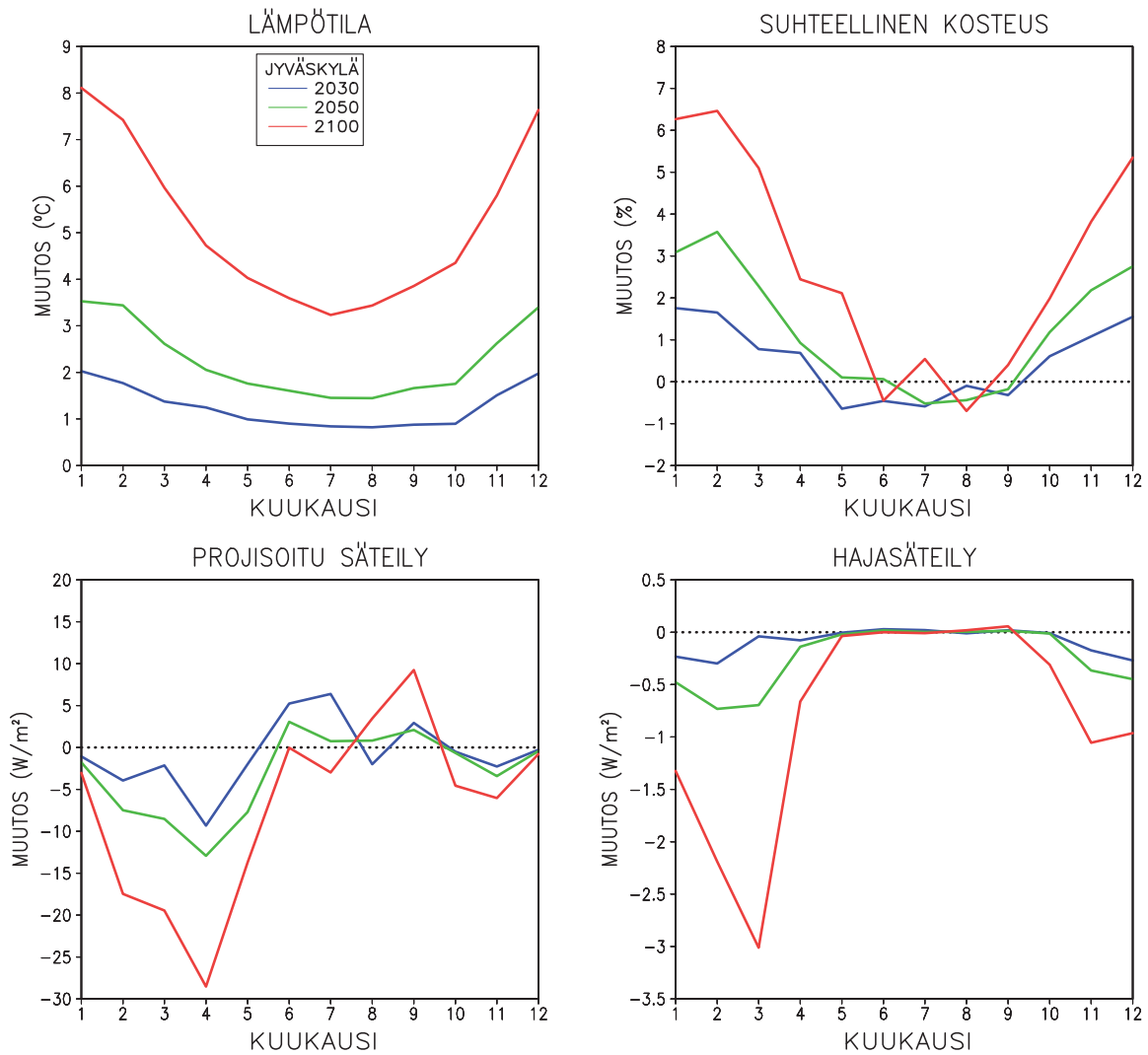
Malliarviot vuorokauden keskilämpötilojen hajonnan sekä auringon kokonaissäteilyn suhteellisista muutoksista kalenterikuukausittain Vantaalla, Jyväskylässä ja Sodankylässä siirryttäessä testivuodesta TRY2012 vuoteen 2100 on esitetty kuvissa L11.2 ja L11.3.



Kuva L11.2. Vuorokauden keskilämpötilojen keskihajonnan suhteellinen muutos kuukausittain Vantaalla, Jyväskylässä ja Sodankylässä siirryttäessä uudesta testivuodesta vuoteen 2100.

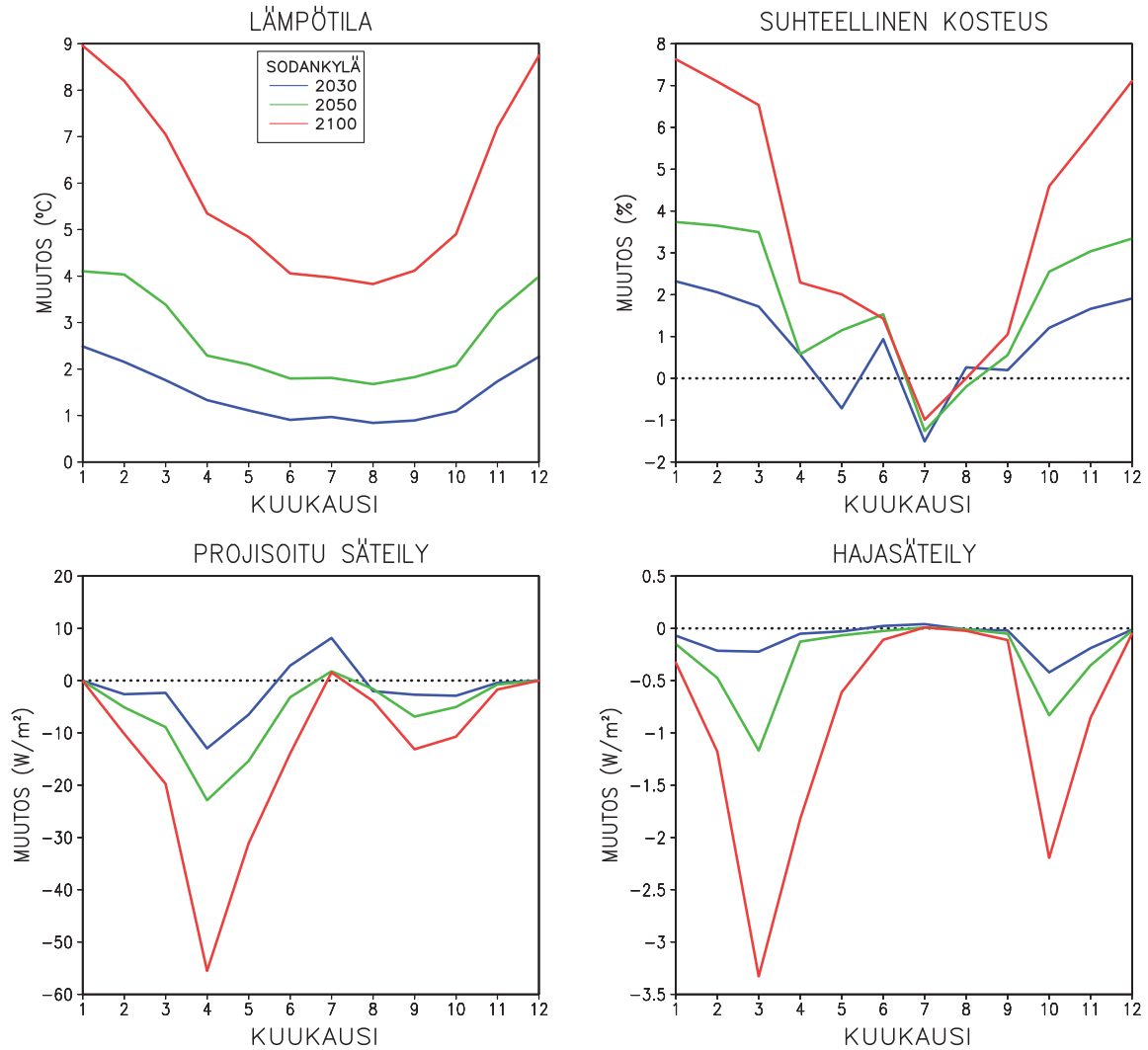


Kuva L11.3. Auringon kokonaissäteilyn suhteellinen muutos kuukausittain Vantaalla, Jyväskylässä ja Sodankylässä siirryttäessä testivuodesta TRY2012 vuoteen 2100.



Kuva L11.4. Lämpötilan, suhteellisen kosteuden, auringon sädettä vastaan kohtisuoralle pinnalle projisoidun suoran säteilyn ja hajasäteilyn muutosten kuukausikeskiarvot Jyväskylässä siirryttäessä testivuodesta vuoteen 2030 (sininen käyrä), 2050 (vihreä käyrä) ja 2100 (punainen käyrä). Huomattakoon eri asteikko suoraa ja hajasäteilyä esittämissä kuvissa.

Kuvissa L11.4 ja L11.5 on esitetty lämpötilan, suhteellisen kosteuden, auringon sädettä vastaan kohtisuoralle pinnalle projisoidun suoran säteilyn ja hajasäteilyn muutosten kuukausikeskiarvot Jyväskylässä ja Sodankylässä siirryttäessä testivuodesta TRY2012 tulevaisuuden testivuosiin 2030, 2050 ja 2100. Taulukkoon L11.1 on koottu näiden ilmastosuureiden sekä lisäksi kokonaissäteilyn ja tuulen nopeuden vuosikeskiarvojen arvioidut muutokset eri lämpötilavyöhykkeillä olettaen, että kasvihuonekaasujen ja pienhiukkasten tulevat pitoisuudet seuraavat A2-skenaariota.



Kuva L11.5. Lämpötilan, suhteellisen kosteuden, auringon sädettä vastaan kohtisuoralle pinnalle projisoidun suoran säteilyn ja hajasäteilyn muutosten kuukausikeskiarvot Sodankylässä siirryttäessä testivuodesta vuoteen 2030 (sininen käyrä), 2050 (vihreä käyrä) ja 2100 (punainen käyrä). Huomattakoon eri asteikko suoraa ja hajasäteilyä esittämissä kuvissa.

Taulukko L11.1. Ilmastosuureiden vuosikeskiarvojen muutokset lämpötilavyöhykkeillä I-II (Vantaa), III (Jyväskylä) ja IV (Sodankylä) testivuosille 2030, 2050 ja 2100. T=lämpötila, RH=suhteellinen kosteus, Grad=kokonaissäteilyn vuo vaakatasolle, RDIR=suoran säteilyn vuo sädettä vastaan kohtisuoralle pinnalle, RDIF=hajasäteilyn vuot vaakatasolle ja WS= tuulen nopeus.

Suure	Vantaa			Jyväskylä			Sodankylä		
	2030	2050	2100	2030	2050	2100	2030	2050	2100
T (°C)	1.2	2.1	4.8	1.3	2.3	5.2	1.5	2.7	5.9
RH (%-yks)	0.2	0.6	1.5	0.5	1.3	2.8	0.9	1.9	3.7
Grad (%)	-0.1	-0.9	-2.7	-0.1	-1.3	-3.4	-0.7	-2.5	-6.3
RDIR (%)	-0.2	-1.8	-4.5	-0.7	-2.7	-6.3	-1.7	-5.4	-12.7
RDIF (%)	-0.3	-0.6	-1.6	-0.2	-0.5	-1.6	-0.2	-0.6	-1.9
WS (%)	0.8	1.3	3.5	0.6	0.9	2.6	0.5	0.8	2.3

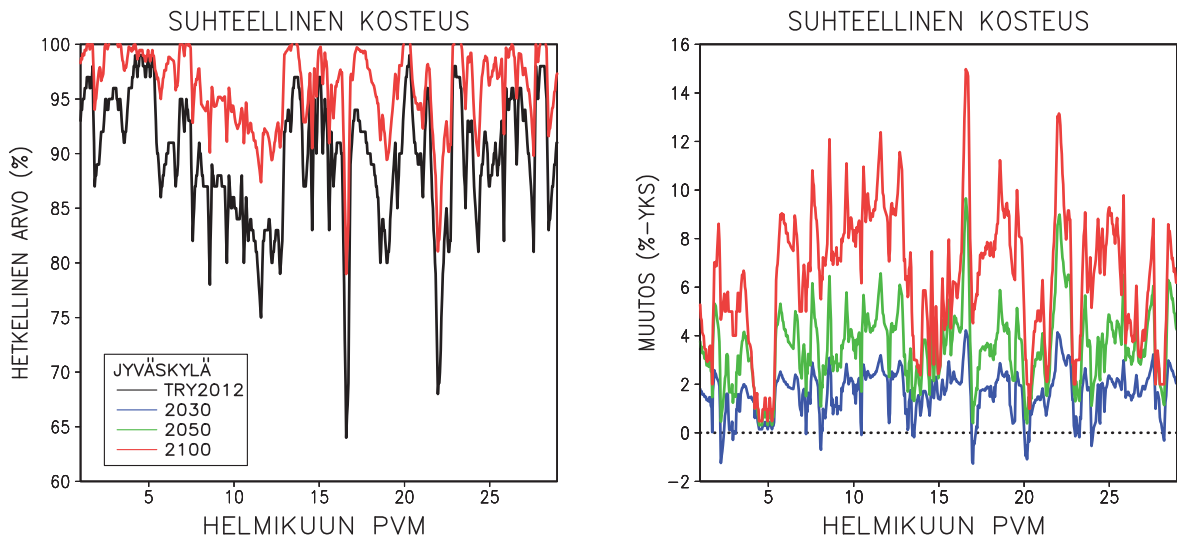
Sääsuureiden hetkellisten arvojen muutoksia

Lämpötilan hetkellisten arvojen muutoksia on esitelty luvussa 8.2. Muiden meteorologisten suureiden hetkellisten arvojen muutokset ovat kesällä varsin pieniä, joten tässä keskitytään käsittelemään talvea. Suhteellista kosteutta laskelmissa käytetty algoritmi (liite 10) kohottaa eniten verrattain kuivissa tilanteissa (kuva L11.6). Hetkellisen kosteuden lisäys on ollut enimmillään 15 prosenttiyksikön luokkaa. Silloin kun kosteus on jo alun alkaen lähellä kyllästystilaa, sitä ei enää juuri ole mahdollista kohottaa. Kuvasta L11.6 nähdään myös muutama tapaus, jolloin kosteus on vuoteen 2030 siirryttäessä jopa hieman pienentynyt. Nämä liittyvät tilanteisiin, jolloin havaintotietojen mukaan lähtötilanteessa on vallinnut ylikyllästystila jään suhteen. Epätarkkaa havaintotietoa on tällöin jouduttu korjaamaan alaspäin ennen kuin se on voitu muuntaa kuvaamaan tulevaa ilmastoa.

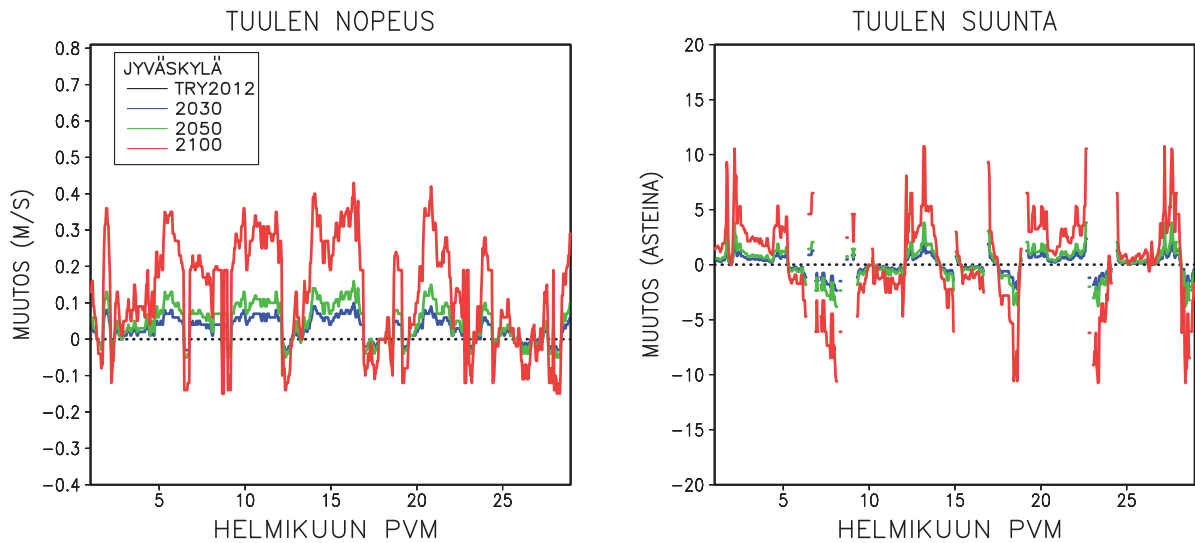
Tuulet ovat uuteen ilmastoon siirryttäessä yleensä hiukan koventuneet, helmikuussa enimmilläänkin kuitenkin vain noin 0.4 m/s (kuva L11.7). Jos lähtötilanteessa on puhallellut idän tai pohjoisen suunnasta, tuulen nopeutta on hiukan pienennetty. Kuten liitteessä 10 kerrottiin, muunnoksen ensimmäisessä vaiheessahan yksittäisten ajanhetkien tuulivektoreita muutettiin mallien ennustamalla tavalla, mikä talvisin johti koillisenpuoleisten tuulien heikkenemiseen ja lounaanpuoleisten tuulien voimistumiseen. Tämän jälkeen tuulen nopeudet vielä kalibroitiin niin, että keskimääräinen skalaarisen tuulen nopeuden kuukausikeskiarvot muuttuivat tarkkaan mallien ennustamalla tavalla.

Yksittäisten ajanhetkien tuulen suunnat eivät ole muuttuneet paljoa: yleensä vain muutaman asteen, v. 2100 enimmillään noin kymmenen astetta (kuva L11.7).

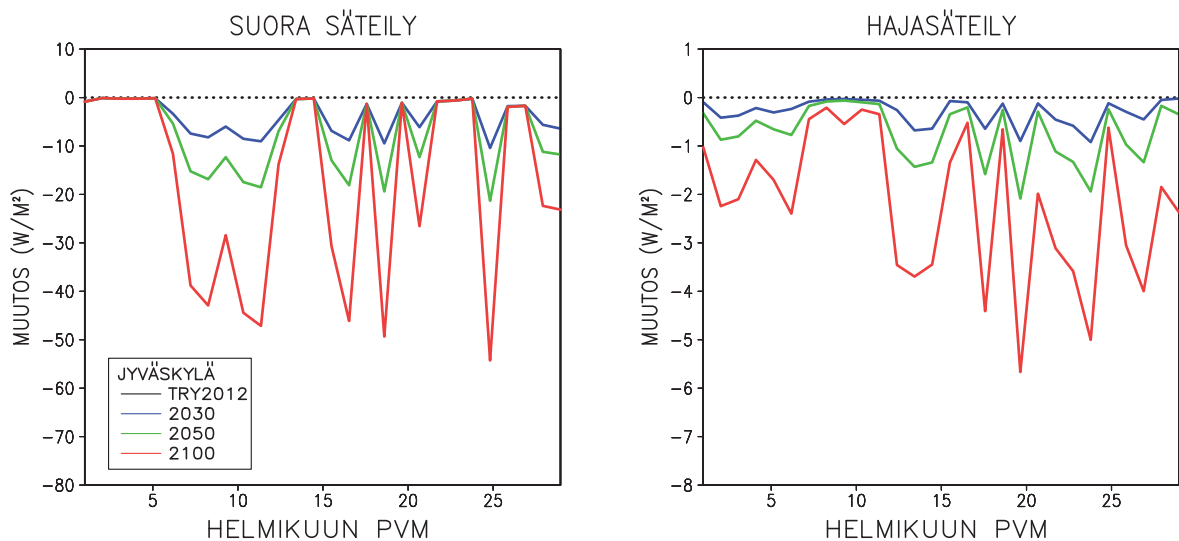
Auringon säteilyn määrä riippuu auringon korkeuskulmasta ja vaihtelee siksi hyvin voimakkaasti kellonajan mukaan. Siksi säteilysuureista on selvyuden vuoksi esitetty tunnitaiten arvojen asemesta vuorokausikeskiarvot (kuva L11.8). Helmikuussa mallit ennustavat säteilyn määrän vähenevän, ja tässä tutkimuksessa käytetty algoritmi (kpl 4) nipistää leijonanosan tästä vähennyksestä suorasta säteilystä. Täysin pilvisinä päivinä, esimerkiksi helmikuun alussa, vähenemä on kuitenkin otettu hajasäteilystä.



Kuva L11.6. Vasen kuva: suhteellisen kosteuden tunnitaitiset arvot Jyväskylässä testivuoden helmikuussa (musta käyrä) sekä laskettuna vuodelle 2100 (punainen käyrä). Oikea kuva: tunnitaiten suhteellisten kosteuksien muutokset Jyväskylässä siirryttäessä testivuodesta vuoteen 2030 (sininen käyrä), 2050 (vihreä käyrä) ja 2100 (punainen käyrä).



Kuva L11.7. Tuulen nopeuden (vasen kuva) ja suunnan (oikea kuva) tunnitusten arvojen muuttuminen Jyväskylässä helmikuussa siirryttäessä testivuodesta vuoteen 2030 (sininen käyrä), 2050 (vihreä käyrä) ja 2100 (punainen käyrä). Jos testivuoden havainnon mukaan kyseisenä ajanhetkenä on ollut tyynä, ei tuulen suunnan muutosta ole voitu laskea.

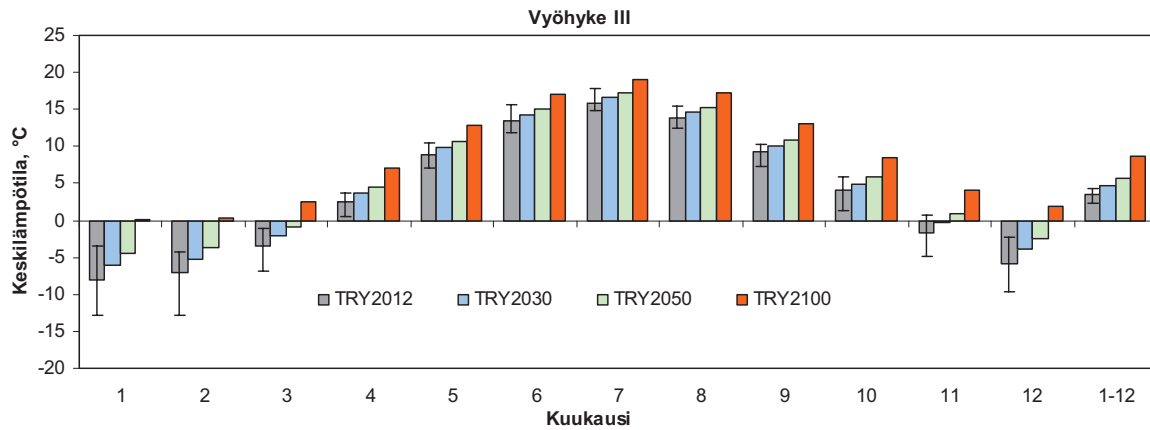


Kuva L11.8. Kohtisuoralle pinnalle projisoidun suoran säteilyn (vasen kuva) ja hajasäteilyn (oikea kuva) vuorokausikeskiarvojen muuttuminen Jyväskylässä helmikuussa siirryttäessä perusjaksosta vuoteen 2030 (sininen käyrä), 2050 (vihreä käyrä) ja 2100 (punainen käyrä). Huomaa asteikon erilaisuus kuvissa.

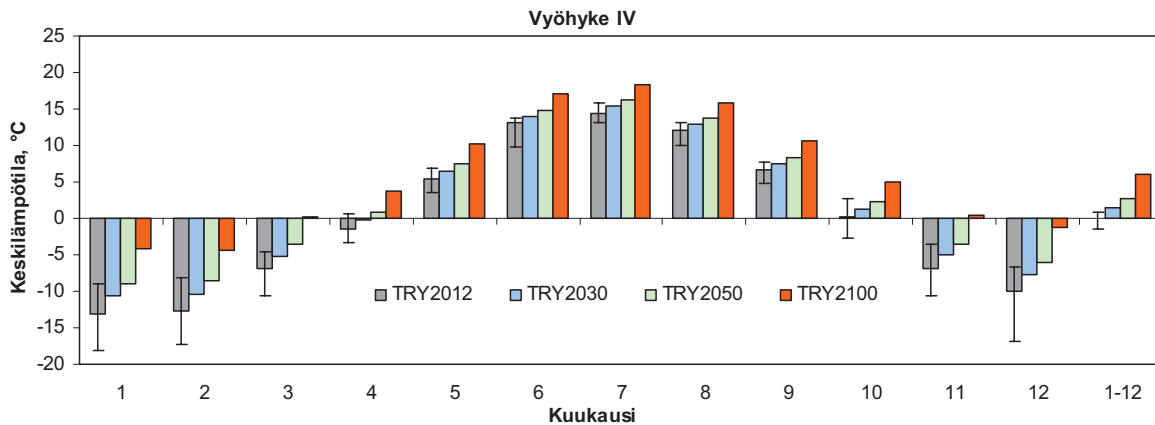
Liite 12. Tulevaisuuden testivuodet: lisäkuvia vyöhykkeille III ja IV

Vyöhykkeiden III ja IV keskimääräinen ilmasto

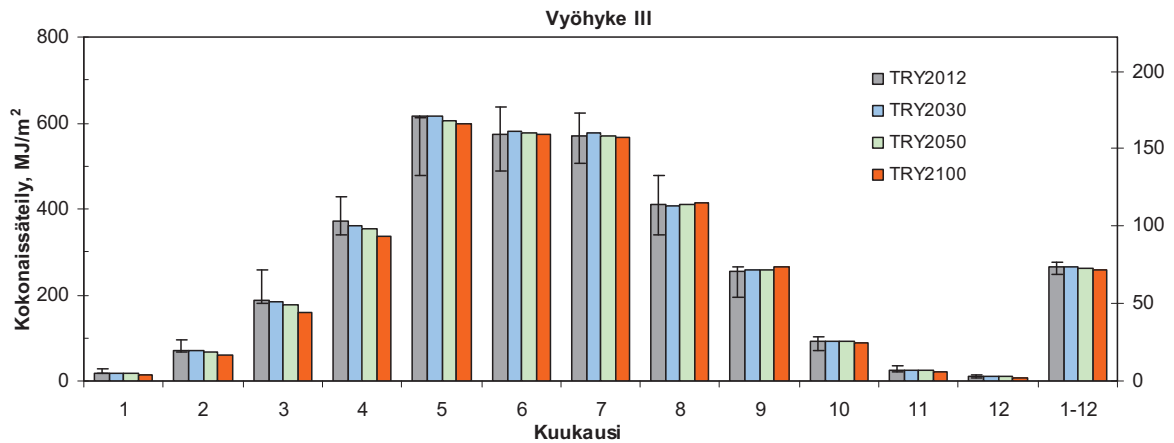
Tulevaisuuden testivuosien mukaiset kuukausikeskilämpötilat ja auringon säteilyenergian kokonaismäärät vaakatasolle kalenterikuukausittain vyöhykkeillä III ja IV on esitetty kuvissa L12.1–L12.4.



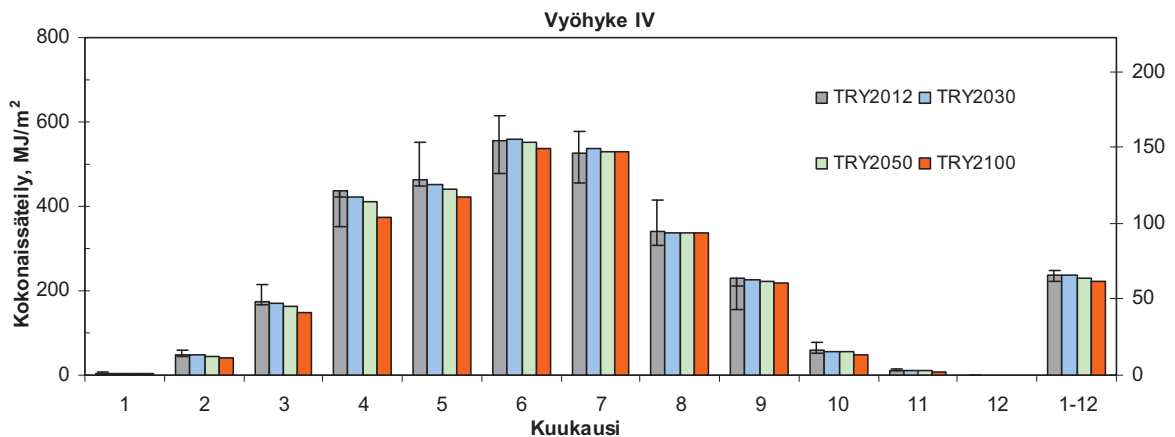
Kuva L12.1. Kuukauden keskilämpötilat Jyväskylän sääaineiston mukaan vyöhykkeellä III uutena testivuotena (TRY2012) sekä tulevaisuuden testivuosina 2030, 2050 ja 2100. Pystyjanat näyttävät \pm keskihajonnan suuruisen poikkeaman jakson 1980–2009 havaintojen mukaisesta kuukausikeskiarvosta (katso kuvaa L6.1). Vuoden keskilämpötila esitetään viimeisillä pylväillä ”1–12”.



Kuva L12.2. Kuukauden keskilämpötila Sodankylän sääaineiston mukaan vyöhykkeellä IV uutena testivuotena (TRY2012) sekä tulevaisuuden testivuosina 2030, 2050 ja 2100. Pystyjanat näyttävät \pm keskihajonnan suuruisen poikkeaman jakson 1980–2009 havaintojen mukaisesta kuukausikeskiarvosta (katso kuvaa L6.4). Vuoden keskilämpötila esitetään viimeisillä pylväillä ”1–12”.



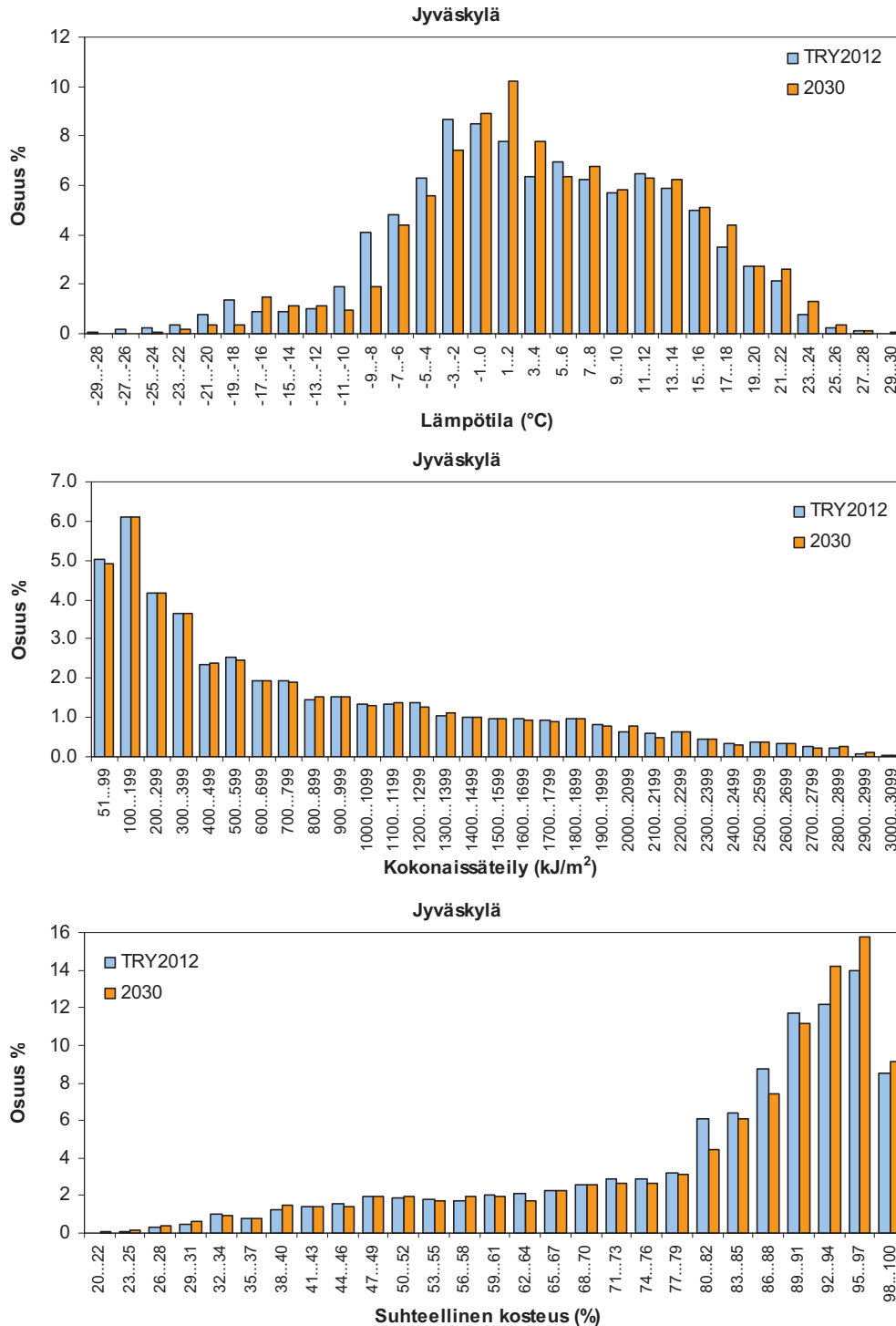
Kuva L12.3. Auringon säteilyenergian kokonaismäärä vaakatasolle kalenterikuukausittain Jyväskylässä (vyöhyke III) uutena testivuotena (TRY2012) sekä tulevaisuuden testivuosina 2030, 2050 ja 2100. Pystyjanat näyttävät \pm keskihajonnan suuruisen poikkeaman jakson 1980–2009 havaintojen mukaisesta kuukausikeskiarvosta (katso kuvaa L6.2). Kalenterikuukausien keskimääräinen säteilysumma esitetään viimeisillä pylväillä ”1–12”. Oikeanpuoleisella pystyakselilla yksikkönä on kWh (1 kWh = 3,6 MJ).



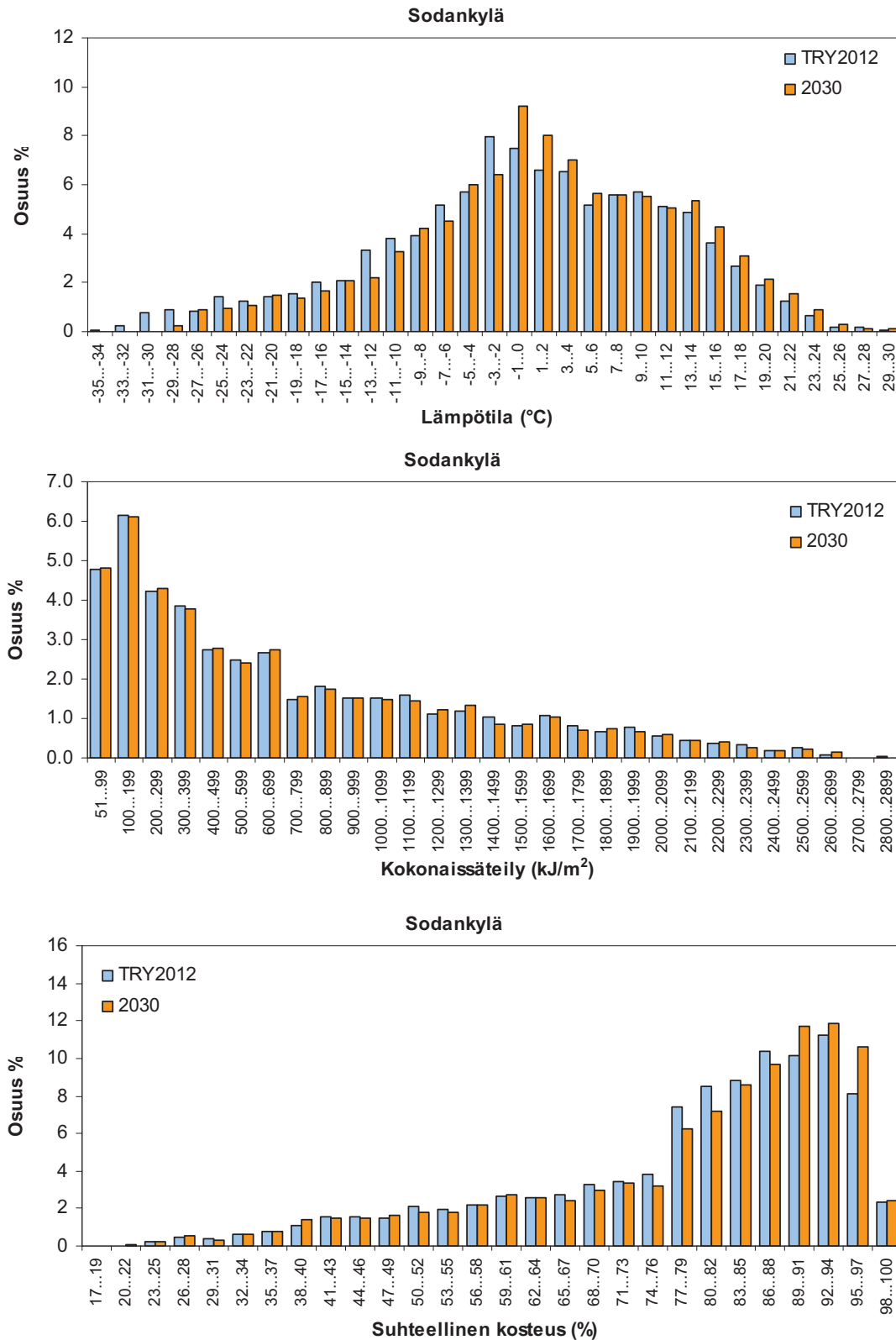
Kuva L12.4. Auringon säteilyenergian kokonaismäärä vaakatasolle kalenterikuukausittain Sodankylässä (vyöhyke IV) uutena testivuotena (TRY2012) sekä tulevaisuuden testivuosina 2030, 2050 ja 2100. Pystyjanat näyttävät \pm keskihajonnan suuruisen poikkeaman jakson 1980–2009 havaintojen mukaisesta kuukausikeskiarvosta (katso kuvaa L6.5). Kalenterikuukausien keskimääräinen säteilysumma esitetään viimeisillä pylväillä ”1–12”. Oikeanpuoleisella pystyakselilla yksikkönä on kWh (1 kWh = 3,6 MJ).

Ilmastosuureiden frekvenssijakaumia testivuonna 2030 vyöhykkeillä III ja IV

Testivuoden TRY2030 ja vertailun vuoksi myös testivuoden TRY2012 aikasarjoista lasketut lämpötilan ja suhteellisen kosteuden frekvenssijakaumat Jyväskylälle ja Sodankylälle on esitetty kuvissa L12.5–L12.6. Vantaan vastaavat jakaumat ovat kuvissa 9.3–9.5.



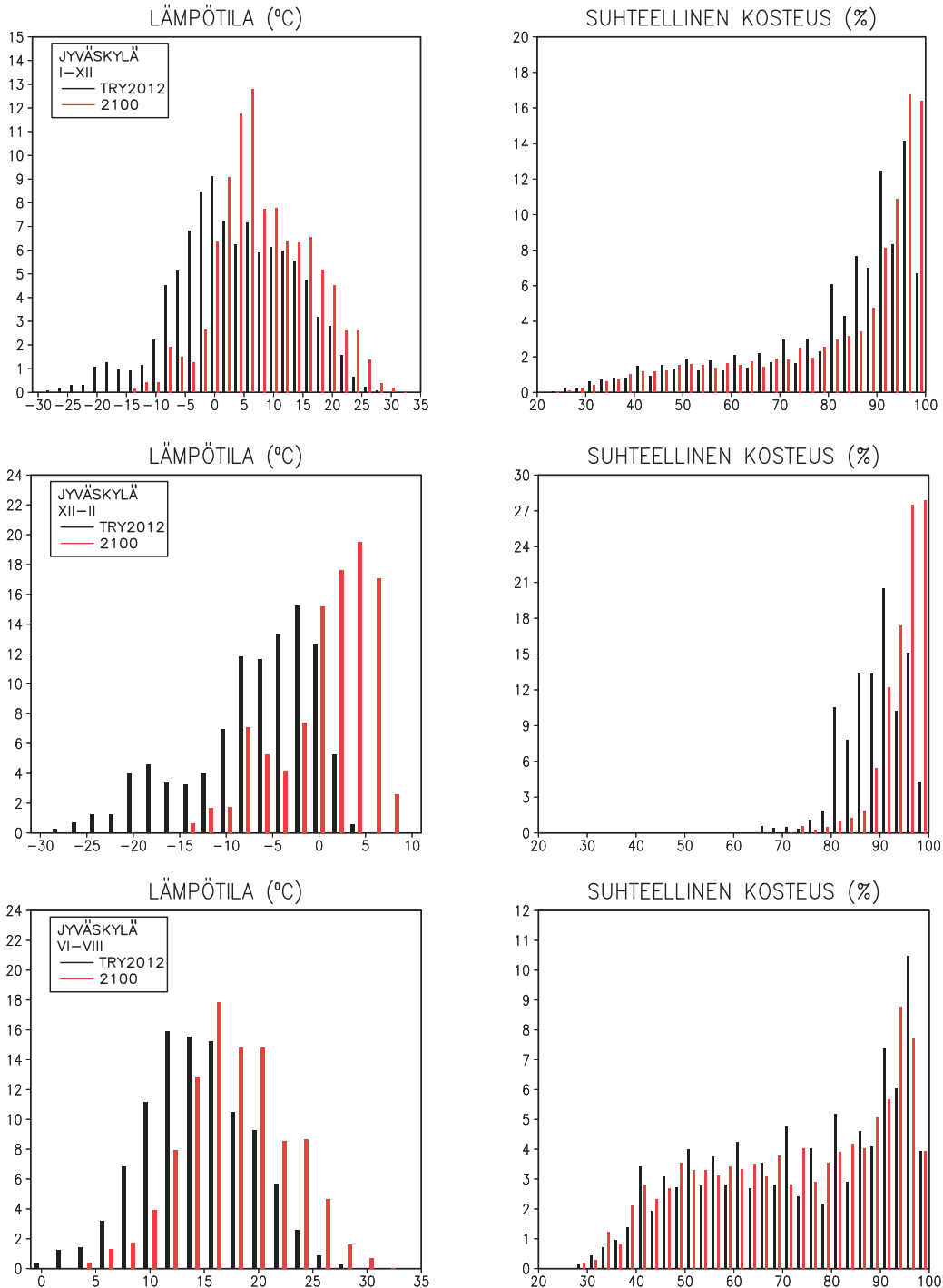
Kuva L12.5. Lämpötilan (ylhällä), tunnin aikana vaakapinnalle kertyneen auringon säteilyenergian (keskellä, vähintään 51 kJ m⁻²) ja ilman suhteellisen kosteuden (alhaalla) suhteelliset frekvenssijakaumat Jyväskylässä (vyöhyke III) uuden testivuoden (TRY2012) tuntiaineistosta laskettuina ja vastaavasti vuonna 2030. Kokonaissäteilyn määrä on nolla tai enintään 50 kJ m⁻² 55 prosentissa testivuosiaineiston tunneista; näitä ei ole esitetty kuvassa.



Kuva L12.6. Lämpötilan (ylhällä), tunnin aikana vaakapinnalle kertyneen auringon säteilyenergian (keskellä, vähintään 51 kJ m⁻²) ja ilman suhteellisen kosteuden (alhaalla) suhteelliset frekvenssijakaumat Sodankylässä (vyöhyke IV uuden testivuoden (TRY2012) tuntiaineistosta laskettuina ja vastaavasti vuonna 2030. Kokonaissäteilyn määrä on nolla tai enintään 50 kJ m⁻² 55 prosentissa testivuosiaineiston tunneista; näitä ei ole esitetty kuvassa.

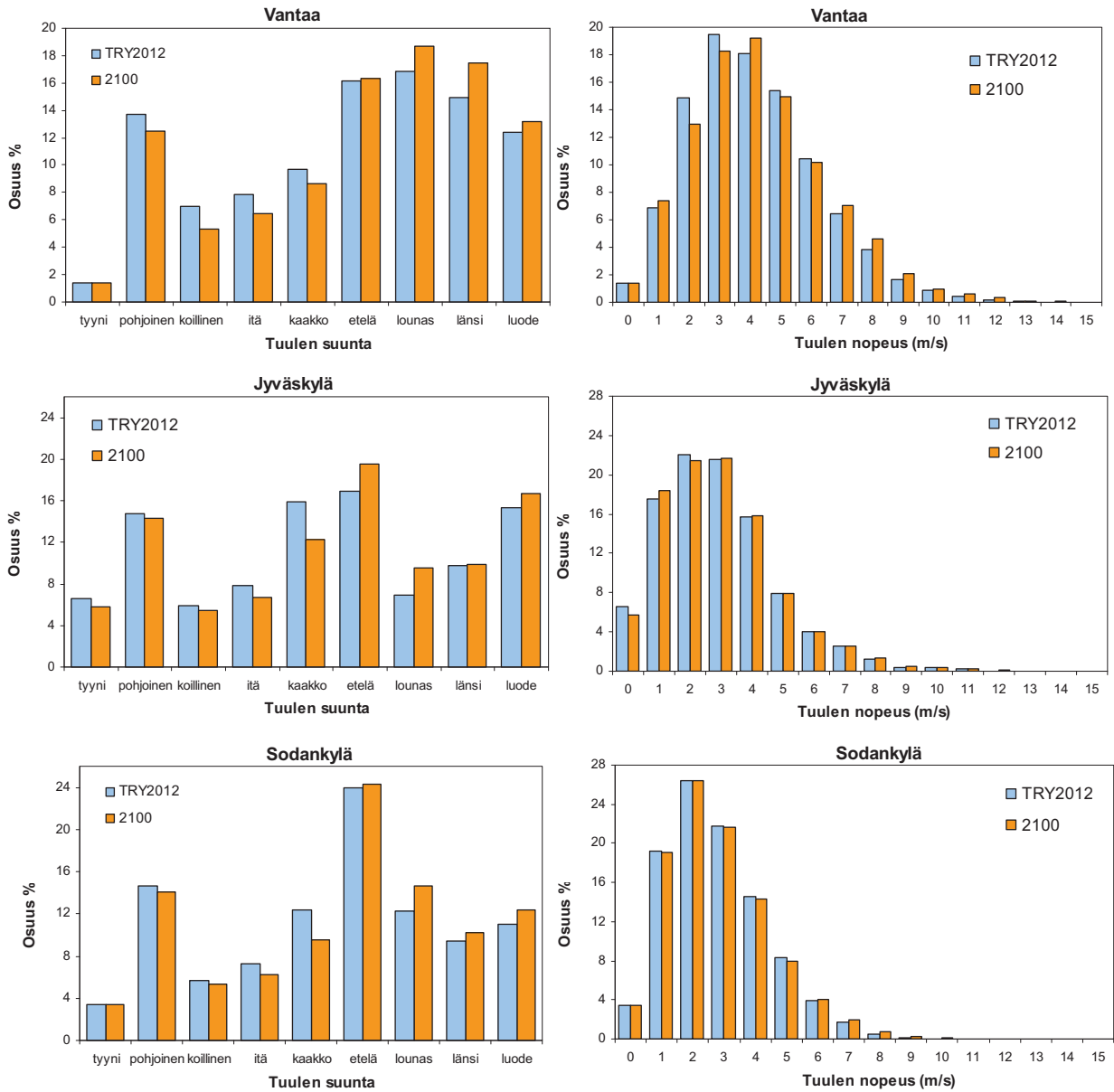
Ilmastosuureiden frekvenssijakaumia testivuonna 2100

Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden frekvenssijakaumat testivuosien TRY2012 ja TRY2100 Jyväskylän aineistoissa on esitetty koko vuodelle sekä päävuodenajoille kuvassa L12.7.



Kuva L12.7 Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden suhteelliset frekvenssijakaumat (prosentteina) Jyväskylässä uuden testivuoden tiedoista laskettuina (mustat pylväät) ja vuonna 2100 (punaiset pylväät); koko vuoden (ylhällä), jouluhelmikuun (keskellä) ja kesä-elokuun (alhaalla) keskiarvoja. Luokitteluväli on lämpötilalle 2 °C ja kosteudelle 2,5 %.

Tuulen suunnan ja nopeuden frekvenssijakaumat testivuosi TRY2012 ja TRY2100 Vantaan, Jyväskylän ja Sodankylän aineistoissa on esitetty kuvassa L12.8.



Kuva L12.8. Tuulen suunnan (vasen) ja nopeuden (oikea) suhteellinen frekvenssijakauma Vantaalla (ylhällä), Jyväskylässä (keskellä) ja Sodankylässä (alhaalla) uuden testivuoden (TRY2012) tuntiaineistosta laskettuna ja vastaavasti vuonna 2100.

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

ILMATIETEEN LAITOS, RAPORTTEJA 2011:6
ISBN 978-951-697-755-6 (NID.)
ISBN 978-951-697-756-3 (PDF)
ISSN 0782-6079

SITRAN SELVITYKSIÄ 53
ISSN 1796-7104 (NID.)
ISSN 1796-7112 (URL:[HTTP://WWW.SITRA.FI](http://www.sitra.fi))
Unigrafia
Helsinki