



ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

RAPORTTEJA
RAPPORTER
REPORTS
2010:4

ITÄMEREN JÄÄPEITTEEN MUUTOKSET
VUOTEEN 2050 MENNESSÄ

ANNA LUOMARANTA
JARI HAAPALA
HILPPA GREGOW
KIMMO RUOSTEENOJA
KIRSTI JYLHÄ
ARI LAAKSONEN

**RAPORTTEJA
RAPPORTER
REPORTS**

No. 2010:4

ITÄMEREN JÄÄPEITTEEN MUUTOKSET VUOTEEN 2050 MENNESSÄ

Anna Luomaranta¹

Jari Haapala¹

Hilppa Gregow¹

Kimmo Ruosteenoja¹

Kirsti Jylhä¹

Ari Laaksonen^{1,2}

¹Ilmatieteen laitos, ²Itä-Suomen yliopisto

Ilmatieteen laitos

Meteorologiska Institutet

Finnish Meteorological Institute

Helsinki 2010

ISBN 978-951-697-735-8 (nid.)

ISBN 978-951-697-736-5 (pdf)

ISSN 0782-6079

Yliopistopaino
Helsinki 2010



Julkaisija	Ilmatieteen laitos, (Erik Palménin aukio 1) PL 503, 00101 Helsinki	Julkaisuaika	2010
Tekijä(t)	Anna Luomaranta, Jari Haapala, Hilppa Gregow, Kimmo Ruosteenoja, Kirsti Jylhä, Ari Laaksonen	Projektin nimi	Toimeksiantaja Arctia Shipping Oy
Nimeke	Itämeren jääpeitteen muutokset vuoteen 2050 mennessä		
Tiivistelmä	Ilmaston lämpeneminen vaikuttaa luontoon ja yhteiskuntaan monin tavoin. Myös Itämeren jääpeitteessä tulee tapahtumaan muutoksia, joilla voi olla vaikutuksia muun muassa merenkulkuun Itämerellä. Tässä raportissa arvioidaan Itämeren jääpeitteen tulevia muutoksia vuoteen 2050 mennessä. Lähinnä keskitytään jääpeitteen maksimilaajuuden ja tasaisen jään keskimääräisen suurimman paksuuden muutoksiin. Selvitys on tehty Arctia Shipping Oy:n tilauksesta.		
<p>Esitetyt tulokset perustuvat havaintoihin ja 19 maailmanlaajuisen ilmastomallin tuloksiin. Havaitun jääpeitteen maksimilaajuuden ja rannikkoalueiden talvilämpötilan välille muodostettiin regressiomalli, jonka avulla ilmastomallituloksia käyttäen laskettiin arvio jääpeitteen maksimilaajuuden jakaumasta neljälle tulevalle vuosikymmenelle 2011-2020, 2021-2030, 2031-2040 ja 2041-2050. Jääpeitteen keskimääräistä suurinta paksuutta samoina vuosikymmeninä arvioitiin Stefanin lain avulla talven pakkasummaa käyttäen.</p> <p>Tulosten mukaan jääpeitteen maksimilaajuus ja sen myötä myös ankarien jäätalvien todennäköisyys tulevat pienenemään. Muutoksia tapahtuu jo lähivuosikymmeninä, mutta viimeistään vuoden 2030 jälkeen ankarat jäätalvet harvinaistuvat, ja vuoden 2040 jälkeen niitä ei juuri enää esiinny. Vastaavasti tarkastelujakson aikana leudot ja erittäin leudot jäätalvet yleistyvät.</p> <p>Tasaisen jään keskimääräistä suurinta paksuutta arvioitiin ainoastaan rannikon läheisillä merialueilla. Saatujen tulosten mukaan keskimääräinen jään suurin paksuus on jaksolla 2011-2020 10-15 cm pienempi kuin vertailujaksolla 1971-2000. Vuoden 2030 jälkeen ero vertailujakson lukemiin on noin 20-25 cm ja vuoden 2040 jälkeen 25-35 cm. Jään paksuuden arviointiin käytetty menetelmä ei kuitenkaan huomioi jään päällä olevaa lunta, joka toimii eristeenä ja näin ollen hidastaa paksuuskasvua. Lasketut jään paksuudet ovat siis noin 10-20 cm liian suuria.</p>			
Julkaisijayksikkö	Ilmastonmuutos (ILM)		
Luokitus (UDK)	551.326 (261.24), 551.583	Asiasanat	Ilmasto, ilmastonmuutos, Itämeri, jääpeite, jääpeitteen laajuus, jään paksuus
ISSN ja avainnimeke	0782-6079 Raportteja – Rapporter - Reports		
ISBN	ISBN 978-951-697-735-8 (nid.) ISBN 978-951-697-736-5 (pdf)	Kieli	suomi (tiivistelmä myös englanniksi ja ruotsiksi)
Myynti	Ilmatieteen laitos / Kirjasto PL 503, 00101 Helsinki	Sivumäärä	Hinta
		23	
		Lisätietoja	



ILMATIETEEN LAITOS

Publicisten	Meteorologiska institutet, (Erik Palméns plats 1) PB 503, 00101 Helsingfors	Publikationens serie, nummer och kod Rapporter 2010: 4
Auktorer	Anna Luomaranta, Jari Haapala, Hilppa Gregow, Kimmo Ruosteenoja, Kirsti Jylhä, Ari Laaksonen	Datum 2010
Titel	Förändringar i Östersjöns istäcke före år 2050	Projektets namn
Sammandrag	Den globala uppvärmningen påverkar naturen och samhället på många olika sätt. Förändringar kommer att ske i Östersjöns istäcke, vilket kan påverka till exempel sjöfarten i Östersjön. I den här rapporten uppskattas de kommande förändringarna i Östersjöns istäcke före år 2050. Mestadels fokuserar vi på förändringar i isens maximala utbredning och fastisens genomsnittliga maximum tjocklek. Forskningen har beställts av Arctia Shipping Ab.	Uppdragsgivare Arctia Shipping Ab
Publicistenhet	Klimatförändringen (ILM)	
Klassificering (UDK)	551.326 (261.24), 551.583	Nyckelord Klimat, klimatförändringen, Östersjön, istäcke, isens maximala utbredning, fastisens tjocklek
ISSN och serietitel	0782-6079 Raportteja – Rapporter - Reports	
ISBN	ISBN 978-951-697-735-8 (nid.) ISBN 978-951-697-736-5 (pdf)	Språk finska (sammandraget finns också på engelska och svenska)
Försäljning	Meteorologiska institutet / Pibliotek Pb 503, 00101 Helsingfors	Sidantal Pris 23 Annotation



FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

Published by

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

Series title, number and report code of publication
Reports 2010:4

Date 2010

Authors

Anna Luomaranta, Jari Haapala, Hilppa Gregow,
Kimmo Ruosteenoja, Kirsti Jylhä, Ari Laaksonen

Name of project

Commissioned by
Arctia Shipping Ltd

Title

The changes in the Baltic Sea ice cover by 2050

Abstract

Global warming affects nature and society in many ways. The winter ice cover of the Baltic Sea, for example, will face changes that can affect the shipping in the Baltic Sea. In this report we assess the future changes in the Baltic Sea ice cover by 2050. We focus mainly on the maximum ice cover extent and the average maximum fast ice thickness. The work was commissioned by Arctia Shipping Ltd.

The results are based on observations and the results of 19 global climate models. A regression model was fitted between the observed maximum ice cover extent and coastal winter temperature. Using this result, and climate model results, the distributions for maximum sea-ice extent for four future decades 2011-2020, 2021-2030, 2031-2040, and 2041-2050, were estimated. The average maximum fast ice thickness for each decade was calculated using Stefan's law and the winter-frost sum.

According to these results, both the maximum ice cover extent and the probability of severe ice winters will decrease. Some changes will be already seen during next few decades. After 2030 severe ice winters will become rare, and after 2040, severe ice winters will rarely occur anymore. Correspondingly, mild and extremely mild ice winters will increase during the study period.

The average maximum fast ice thickness was assessed only in coastal sea areas. We find that the average maximum fast ice thickness during 2011-2020 will be about 10-15 cm thinner than the fast ice thickness for 1971-2000. After 2030 the difference to 1971-2000 will be about 20-25 cm and after 2040 about 25-35 cm. However, the method used in assessing the ice thickness does not take into account the snow layer on top of the ice cover. Snow acts as an insulator and slows down the growth of ice thickness. The calculated ice thicknesses are thus about 10-20 cm too large.

Publishing unit

Climate Change (ILM)

Classification (UDK)

551.326 (261.24), 551.583

Keywords

Climate, climate change, Baltic Sea, ice cover, ice cover extent, ice thickness

ISSN and series title

0782-6079 Raportteja – Rapportter - Reports

ISBN

ISBN 978-951-697-735-8 (nid.)
ISBN 978-951-697-736-5 (pdf)

Language

Finnish (Abstract also in Swedish and English)

Sold by

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

Pages

23

Price

Note

Sisältö

1. JOHDANTO	7
2. AINEISTO JA MENETELMÄT	8
2.1. Ilmastomallit ja skenaariot.....	8
2.2. Regressiomalli jääpeitteen maksimilaajuuden muutokselle	9
2.3. Jääpeitteen paksuuden muutos Stefanin lain mukaan.....	12
3. TULOKSET	13
3.1. Jääpeitteen laajuuden muutos	13
3.2. Jääpeitteen paksuuden muutos.....	17
3.3. Tuulisuuden, ahtojääolojen ja jään puristavuuden muutokset.....	21
4. YHTEENVETO	22
5. VIITTEET	23

1. Johdanto

Ilmastonmuutoksella tulee olemaan monenlaisia vaikutuksia luontoon ja yhteiskuntaan. Vaikutusten suuruus riippuu siitä, kuinka herkkiä yhteiskunta ja luonnon eri järjestelmät ovat sään ja ilmaston vaihteluille ja muutoksille. Vaikutusten voimakkuus riippuu myös tulevien päästöjen suuruudesta: jos päästöjä ei saada leikattua, ovat vaikutuksetkin suuremmat.

Suomessakin ilmastonmuutos vaikuttaa sekä luontoon että rakennettuun ympäristöön. Yhteiskuntamme on kuitenkin varsin hyvin sopeutunut nykyilmaston vaihtelevuuteen, minkä vuoksi on odotettavissa, että ilmastonmuutoksen yhteiskunnalliset ja taloudelliset vaikutukset ovat lähivuosikymmeninä suhteellisen lieviä. Ilmastonmuutoksen vaikutukset monilla muilla maailman alueilla voivat olla paljon vakavampia, mikä toki voi vaikuttaa Suomeenkin.

Ilmastonmuutoksen vaikutukset tulevat ulottumaan myös liikennejärjestelmiin, mutta vaikutusten merkittävyys vaihtelee liikennemuodosta riippuen. Mahdollinen muutoksesta hyötyminen edellyttää sopeutumista jo muuttuneisiin ja tulevaisuudessa yhä enemmän muuttuviin olosuhteisiin.

Tässä raportissa tarkastellaan Itämeren jääolojen odotettavissa olevia muutoksia vuoteen 2050 mennessä. Pääpaino on jääpeitteen laajuuden ja tasaisen jään paksuuden muutoksissa, mutta myös tuulisuuden muutoksia tarkastellaan lyhyesti. Selvitys on tehty Arctia Shipping Oy:n tilauksesta. Itämeren tutkijat ovat jo aikaisemmin laatineet IPCC-raporttia vastaavan ilmastonmuutoksen arviointiraportin Itämerelle (BACC (2008) = BALTEX Assesment of Climate Change). BACC-raportin tekemiseen osallistui noin sata merentutkijaa, meteorologia ja hydrologia. Kyseisen raportin päätulos on, että lämpötila on kohonnut viime vuosikymmenien aikana Itämeren alueella noin 0,07 °C vuosikymmenessä. Samoin ilman minimi- ja maksimilämpötilat ovat kohonneet, talvikauden sadanta on lisääntynyt, merijään laajin ulottuvuus on pienentynyt ja jääpeitteen ajan kesto on lyhentynyt. Raportin mukaan ilmasto lämpenee Itämeren alueella 3-5 °C seuraavan sadan vuoden aikana. Arvioiden mukaan lämpeneminen on suurinta talvikautena Perämeren ja Selkämeren alueella, missä lämpötila voi nousta 4-6 °C.

Aikaisemmat tutkimukset ilmastonmuutoksen vaikutuksesta Itämeren jääoloihin ovat keskittyneet keskimääräisten jääolojen muutoksiin tämän vuosisadan lopulla. Tässä tutkimuksessa arvioidaan, miten jääolot muuttuvat lähivuosikymmenien aikana. Tutkimuksessa käytetään uudempia ilmastonmuutosarvioita kuin BACC-raportissa.

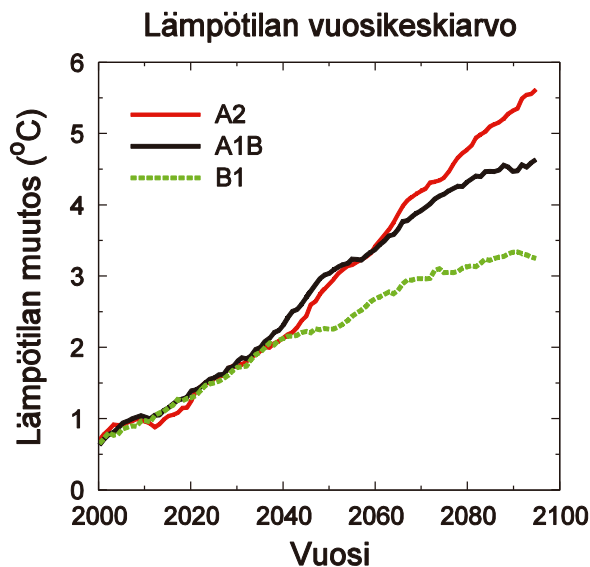
Raportissa kerrotaan ensin käytetystä aineistosta ja menetelmästä, sen jälkeen esitellään jääpeitteen maksimilaajuutta ja kiintojään paksuutta koskevat tulokset. Lisäksi lyhyesti käsitellään tuulisuuden muutoksia ja mahdollisia vaikutuksia ahtojäiden esiintymiseen. Raportti päättyy yhteenvedoon.

2. Aineisto ja menetelmät

2.1. Ilmastomallit ja skenaariot

Tulevaisuuden ilmasto-oloja arvioidaan ilmastomallien avulla. Ilmastomalli on tietokoneohjelma, joka rakentuu maapallon ilmastoa säätelevien fysiikan lakien pohjalle. Näitä fysiikan lakeja joudutaan kuitenkin mallia laadittaessa yksinkertaistamaan muun muassa tietokoneiden laskentakapasiteettien takia. Ilmastojärjestelmän mallittamiseen liittyy epävarmuutta, jota aiheutuu kolmesta tekijästä: 1) Ilmastomalleissa on epätarkkuuksia, jotka aiheutuvat edellä mainitusta fysiikan lakien yksinkertaistamisesta. 2) Kasvihuonekaasupäästöjen tulevaa kehitystä ei tiedetä, joten niitä joudutaan arvioimaan erilaisten päästöskenaarioiden avulla. 3) Ilmasto vaihtelee luonnostaankin muun muassa auringon vaihtelevan aktiivisuuden ja tulivuoritoiminnan takia. Ilmastomallien avulla ei siis saada tarkkaa ennustetta tulevaisuuden ilmastosta vaan ainoastaan arvio siitä, mitä voi tapahtua.

Ilmastomalleja on maailmalla käytössä useita, ja eri ilmastomallien tulokset poikkeavatkin toisistaan. Ilmastoennusteita tehtäessä käytetään siksi useampaa kuin yhtä mallia, sillä usean mallin tulosten keskiarvo tuottaa yleensä paremman ennusteen kuin mikään yksittäinen malli. Tässä tutkimuksessa käytettiin 19 maailmanlaajuisen ilmastomallin tuloksista laskettuja keskiarvoja (Jylhä et al., 2009).



Kuva 1. Suomen vuosikeskilämpötilan muutos asteina verrattuna jakson 1971–2000 keskiarvoon; koko Suomelle laskettuja 11 vuoden liukuvia aluekeskiarvoja. Nämä 19 maailmanlaajuisen ilmastomallin tulosten keskiarvoina saadut ennusteet on esitetty erikseen kolmen eri kasvihuonekaasuskenaarion (A1B, A2, B1) mukaan (Jylhä et al., 2009).

Tulevaisuudessa tapahtuvia lämpötilan muutoksia arvioidaan erilaisten kasvihuonekaasujen päästöskenaarioiden avulla. Yleisimmin käytössä ovat IPCC:n SRES-skenaariot, joista on kerrottu

IPCC:n (2007) raportin yhteenvedon lopussa olevassa liitteessä¹. Näistä A2-skenaario olettaa päästöjen kasvun jatkuvan tulevaisuudessakin nopeana, B1-skenaariossa päästöjä oletetaan tehokkaasti rajoitettavan. A1B-Skenaario edustaa näiden kahden skenaarion välimuotoa. Kuvassa 1 on esitetty lämpötilan vuosikeskiarvon muutos Suomen alueella tämän vuosisadan kuluessa näiden kolmen eri päästöskenaarion mukaan. Vuoteen 2050 mennessä eri skenaarioiden väliset lämpötilaerot ovat vielä pieniä, joten skenaarion valinnalla ei ole tulosten kannalta suurta merkitystä. Tässä tutkimuksessa käytettiin A1B-skenaarion mukaista lämpötilan muutosta.

Tulevaisuuden lämpötilaskenaariot muodostettiin siten, että ilmastomallien keskiarvoina saatiin ennustettuihin lämpötilan muutoksiin lisättiin jakson 1951-2000 aikaiset havaitut kuukausilämpötilat, jotka on esitetty maa-alueet kattavassa 25 km x 25 km:n hilassa (Haylock et al., 2008).

2.2. Regressiomalli jääpeitteen maksimilaajuuden muutokselle

Jäätalvet luokitellaan jääpeitteen suurimman vuotuisen laajuuden perusteella viiteen ankaruusluokkaan. Nämä luokat on esitetty taulukossa 1. Luokitus perustuu havaintoaineistoon vuosilta 1720-1996 (Seinä ja Palosuo, 1996).

Taulukko 1. Jäätalvien ankaruusluokitus.

Jäätalven ankaruus	Jään esiintymislaajuus (km ²)
Erittäin leuto	52000-81000
Leuto	81001-139000
Keskimääräinen	139001-279000
Ankara	279001-383000
Erittäin ankara	383001-420000

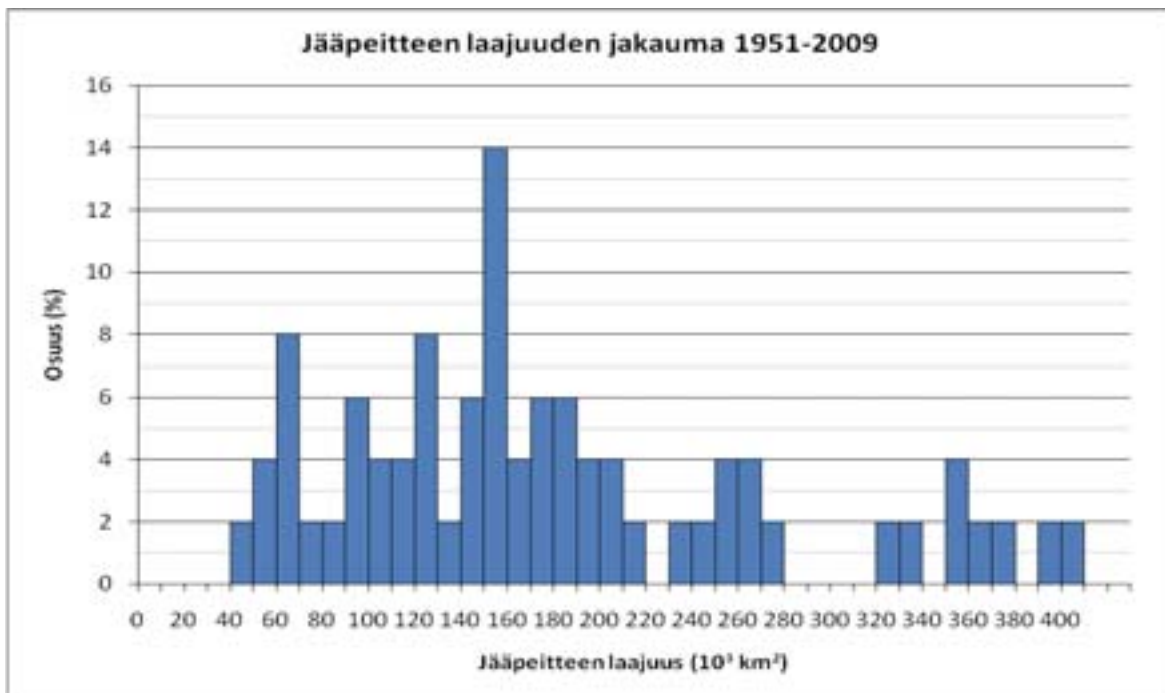
Kuvassa 2 näkyy havaintojen mukainen jääpeitteen maksimilaajuuden frekvenssijakauma jaksolla 1951-2009. Havaittujen jääpeitteen laajuuksien ja rannikkoalueiden marras-maaliskuun keskilämpötilojen välille voidaan sovittaa regressiomalli (kuva 3). Regressiomallia käyttäen voidaan ilmastomalleista saatujen tulevien lämpötilojen avulla arvioida jääpeitteen laajuutta tulevaisuudessa. Alueet, joilta rannikkoalueiden lämpötilahavainnot on käytetty, näkyvät kuvassa 4.

Kuvan 3 regressiomalli voidaan esittää yhtälön muodossa:

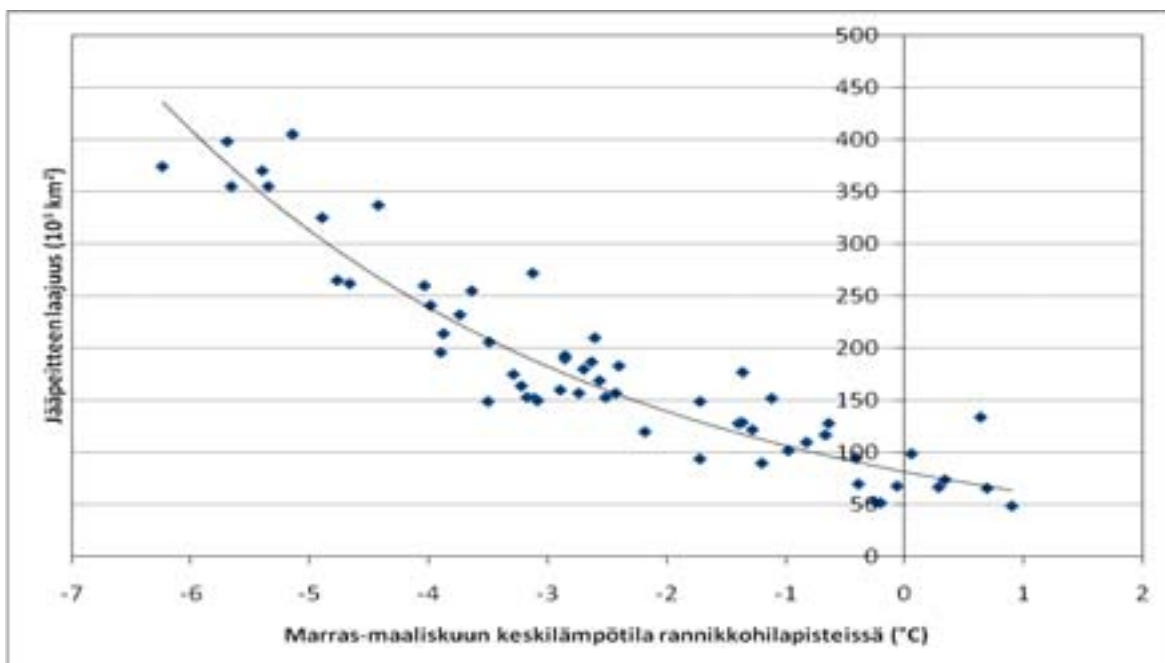
$$y = 81307 e^{-0,2695x} \quad (1)$$

Yhtälössä y on jääpeitteen maksimilaajuus neliökilometreinä ja x rannikkopisteiden talven keskilämpötila Celsius-asteina. Mallin selitysaste on $R^2=0,8439$. Selitysaste kertoo, kuinka suuri osa kokonaisvaihtelusta on selitettävissä mallin avulla. Tässä tapauksessa malli selittää noin 84 % havaitusta vaihtelusta, mikä on hyvä tulos. Mallin RMS-virhe on 31964,15 km².

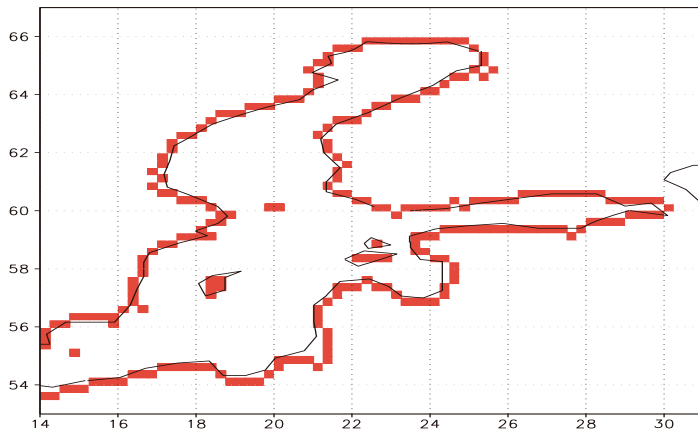
¹ IPCC-raportin (2007) yhteenvedon suomenkielinen versio on luettavissa verkossa osoitteessa http://www.fmi.fi/ilmastonmuutos/ipcc_3.html.



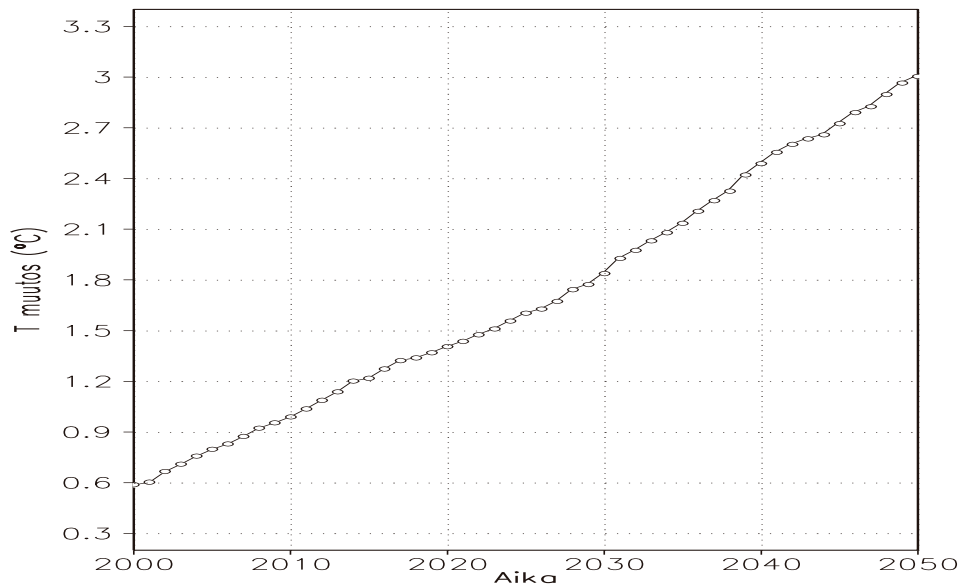
Kuva 2. Itämeren jääpeitteen suurimman vuotuisen laajuuden frekvenssijakauma havaintojen mukaan talvina 1951-2009.



Kuva 3. Itämeren jääpeitteen vuotuinen suurin laajuus ja rannikkoalueiden marras-maaliskuun keskilämpötila vuosina 1951-2009 havaintojen mukaan (siniset symbolit) sekä havaintoihin sovitettu regressiomalli (musta käyrä).



Kuva 4. Rannikkohilapisteet, joiden lämpötiloja on käytetty regressiomallia (1) muodostettaessa (243 kpl).



Kuva 5. Rannikkohilapisteiden keskilämpötilan muutos marras-maaliskuussa verrattuna perusjaksoon 1971-2000 A1B-päästöskenaarion mukaan; 19 maailmanlaajuisen ilmastomallin tulosten keskiarvo.

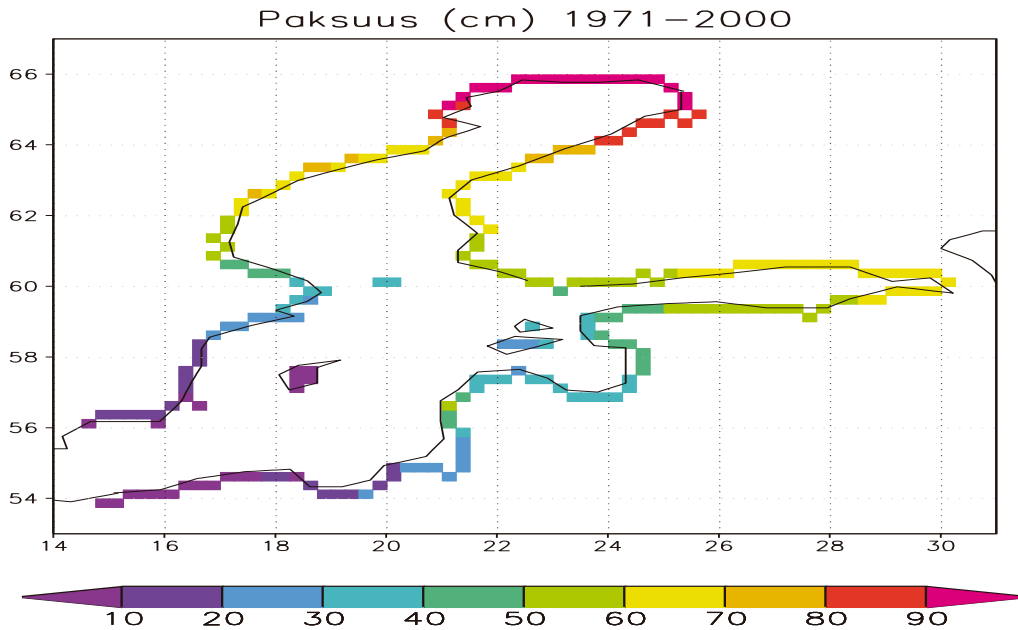
Tulevaisuuden lämpötila-arvio saadaan ilmastomallien tuloksista. Tässä tutkimuksessa käytettiin 19 maailmanlaajuisen ilmastomallin tuloksista (Jylhä et al., 2009) saatua arviota marras-maaliskuun lämpötilan muutoksesta (kuva 5) neljälle eri vuosikymmenelle: 2011-2020, 2021-2030, 2031-2040, 2041-2050. Malleista saatu ennustettu muutos kunakin vuosikymmenenä lisättiin jakson 1951-2000 kunkin vuoden havaintuihin lämpötiloihin (Haylock et al., 2008), jolloin saatiin kullekin tulevaisuuden vuosikymmenelle kuvitteellinen havaintosarja (lämpötilan frekvenssijakauma) kuvaamaan ilmastoa ja sääolojen vaihtelua vuodesta toiseen (ns. delta-menetelmä). Näin saadut tulevaisuuden lämpötilat sijoitettiin yhtälöön (1), jolloin voitiin laskea jääpeitteen maksimilaajuuden tilastollinen jakauma kullekin tarkastelujakson vuosikymmenelle.

2.3. Jääpeitteen paksuuden muutos Stefanin lain mukaan

Tasaisen jään keskimääräistä suurinta paksuutta voidaan arvioida Stefanin lain avulla:

$$h = \sqrt{a^2 S + d^2} - d \quad (2)$$

Yhtälössä (2) h on jääpeitteen paksuus, S pakkassumma eli negatiivisten vuorokausikeskiarvojen summa, $a=3 \text{ cm}(\text{°C}\cdot\text{vrk})^{-1/2}$ ja d ilman pintakerroksen eristystehokkuus jään yllä, suuruudeltaan n. 10 cm. Stefanin laki yliarvioi hieman (n. 10-20 cm) jään paksuutta (Leppäranta, 1993), koska se ei ota huomioon jään päällä olevan lumen eristävää vaikutusta.

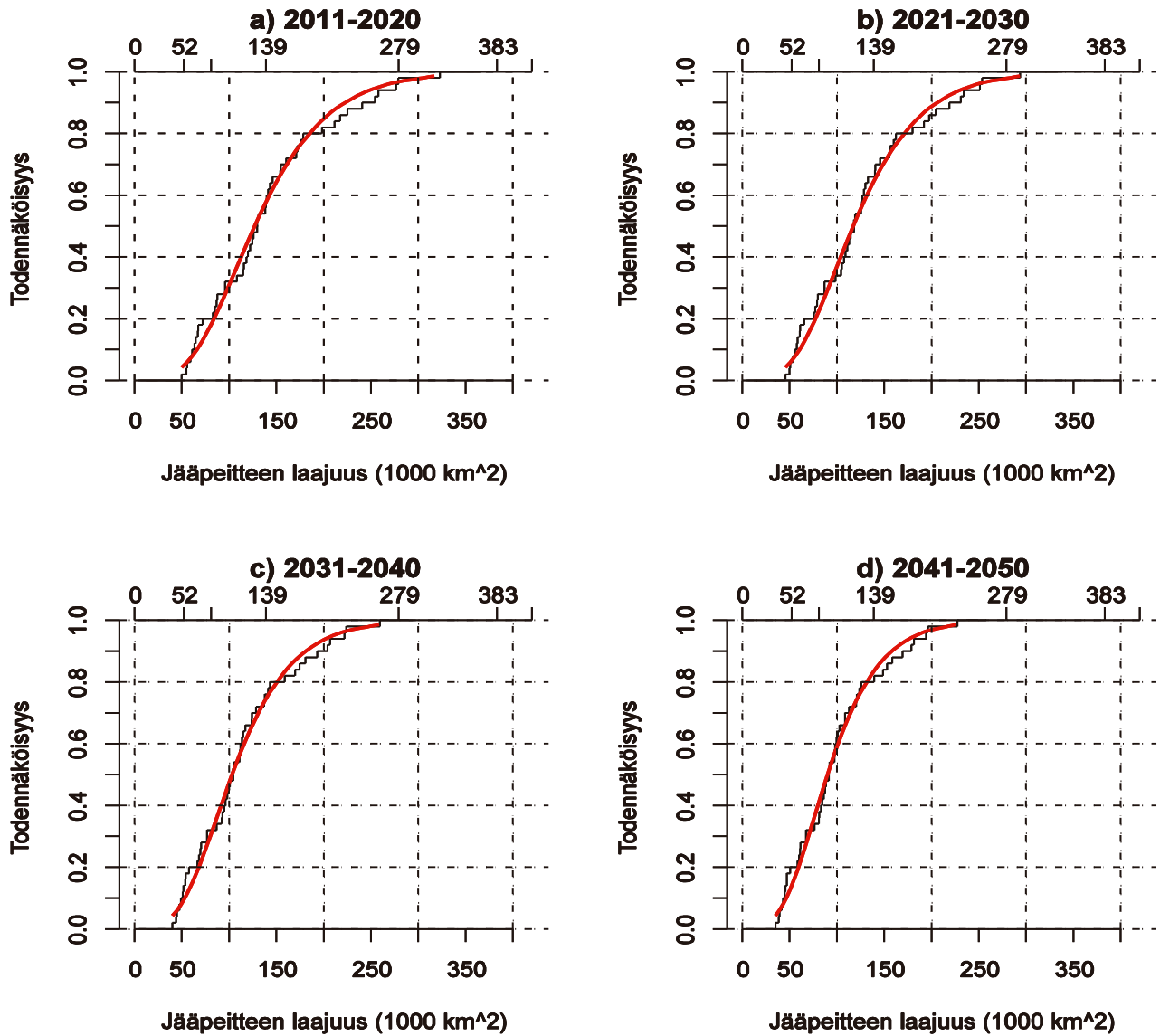


Kuva 6. Jään keskimääräinen suurin paksuus (cm) havaitun pakkassumman perusteella vuosina 1971-2000 yhtälön (2) mukaan rannikon läheisillä merialueilla.

Yhtälössä (2) tarvittava pakkassumma (S) tulevana vuosikymmeninä saadaan arvioitua ilmasto-mallitulosten mukaisen lämpötilan muutoksen (kuva 5) avulla. Lämpötilan muutos kunakin tarkastelujakson vuosikymmenenä lisättiin jakson 1971-2000 havaittuun keskilämpötilaan, jolloin saatiin kullekin tarkastelujakson vuosikymmenelle arvio keskimääräisestä lämpötilasta. Käytetyt aineistot sisälsivät lämpötilan kuukausikeskiarvoja, joista saatiin kuukauden pakkassumma kertomalla pakkasen puolella oleva keskilämpötila kuukauden päivien lukumäärällä. Sijoittamalla kunkin tulevan vuosikymmenen keskimääräinen pakkassumma yhtälöön (2) saadaan arvio jään paksuudelle näinä vuosikymmeninä. Koska lämpötilahavaintoja on vain rannikon läheisiltä maa-alueilta, mallin avulla saadut tulokset kuvaavat kiintojään paksuutta ainoastaan rannikon läheisillä merialueilla. Kuvassa 6 on esitetty jakson 1971-2000 jään keskimääräinen suurin paksuus, joka on laskettu yhtälöstä (2) havaitun pakkassumman perusteella.

3. Tulokset

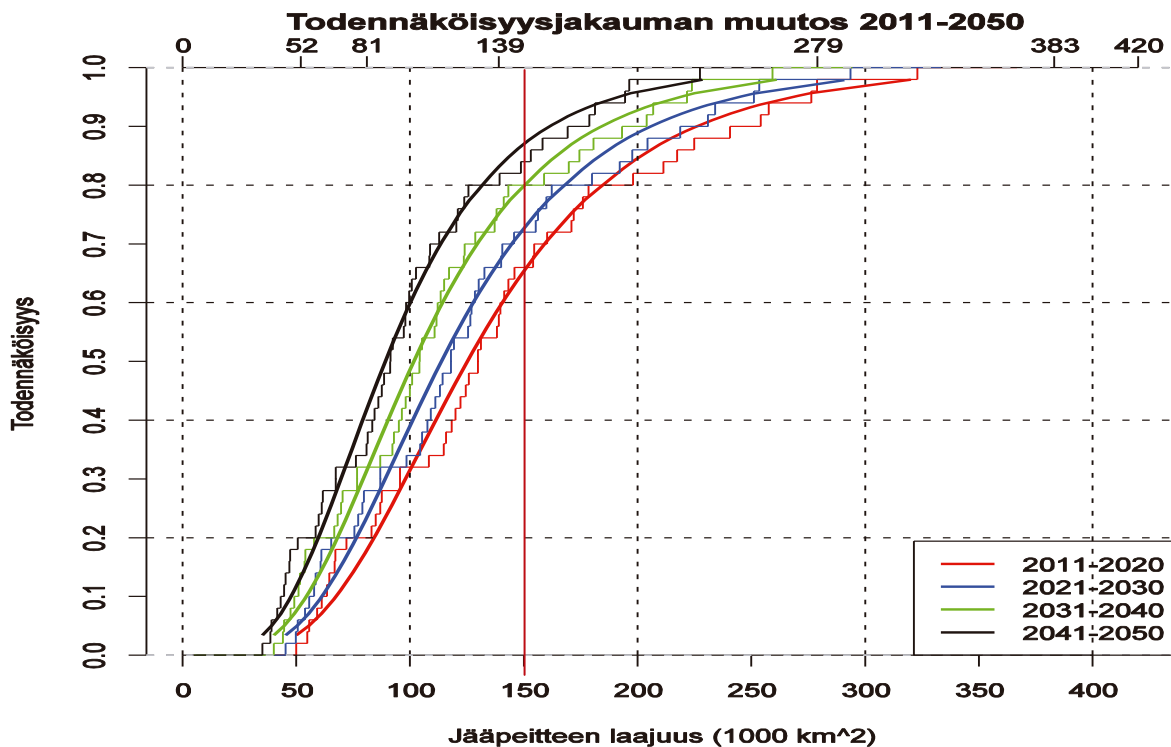
3.1. Jääpeitteen laajuuden muutos



Kuva 7. Jääpeitteen maksimilaajuuden kehitys Itämerellä tulevina vuosikymmeninä regressioyh-tälön (1) mukaan: a) 2011-2020, b) 2021-2030, c) 2031-2040, d) 2041-2050. Musta käyrä esittää empiirisen kertymätodennäköisyyden, punainen käyrä on teoreettinen kertymätodennäköisyys, joka on saatu sovittamalla aineistoon yleinen ääriarvojakautuma eli GEV-jakauma (Coles, 2001). Kertymätodennäköisyys ilmaisee, millä todennäköisyydellä jäätä esiintyy korkeintaan jokin tietty määrä. Kuvien yläakselilla on jäätälvien ankaruusluokituksen mukaiset jään maksimilaajuuden luokkarajat (taulukko 1).

Ilmaston lämmetessä jääpeitteen maksimilaajuus pienenee tulevina vuosikymmeninä. Kuvassa 7 on esitetty jääpeitteen maksimilaajuuden kertymätodennäköisyysjakauman muutos vuoteen 2050 mennessä, kun oletetaan ilmaston lämpenevän sen mukaan kuin mallit keskimäärin ennustavat. Jaksolla 2011-2020 (kuva 7a) ankarien jäätalvien esiintymistodennäköisyys (jäätä enemmän kuin $279 \cdot 10^3 \text{ km}^2$) on alle 10 %. Jaksolla 2021-2030 (kuva 7b) ankaria jäätalvia esiintyy entistä harvemmin, todennäköisyys niille on n. 5 %. Lopulta jaksolla 2041-2050 (kuva 7d) ankaria jäätalvia ei tulosten mukaan esiinny enää ollenkaan. Vastaavasti leutojen ja erittäin leutojen jäätalvien todennäköisyys kasvaa koko ajan tarkastelujakson aikana.

Vastaava tulos nähdään myös, kun tarkastellaan kuvaa 8, jossa kunkin vuosikymmenen todennäköisyysjakaumat on piirretty samaan kuvaan. Jakauma siirtyy kohti kuvan vasenta yläkulmaa, eli leutojen ja erittäin leutojen talvien osuus kasvaa ja ankarien vähenee. Esimerkiksi jaksolla 2011-2020 todennäköisyys sille, että jääpeitteen maksimilaajuus on korkeintaan $150 \cdot 10^3 \text{ km}^2$ on noin 65 % (luetaan kuvasta 8 kohdasta, jossa punainen pystyviiva leikkaa todennäköisyysjakaumakäyrät), ja jaksolla 2021-2030 tämä todennäköisyys on hieman yli 70 %. Jaksolla 2031-2040 todennäköisyys on 80 % ja lopulta jaksolla 2041-2050 se on melkein 90 %. Talvet, joina jääpeitteen laajuus ylittää $150 \cdot 10^3 \text{ km}^2$, harvinaistuvat siis koko ajan.

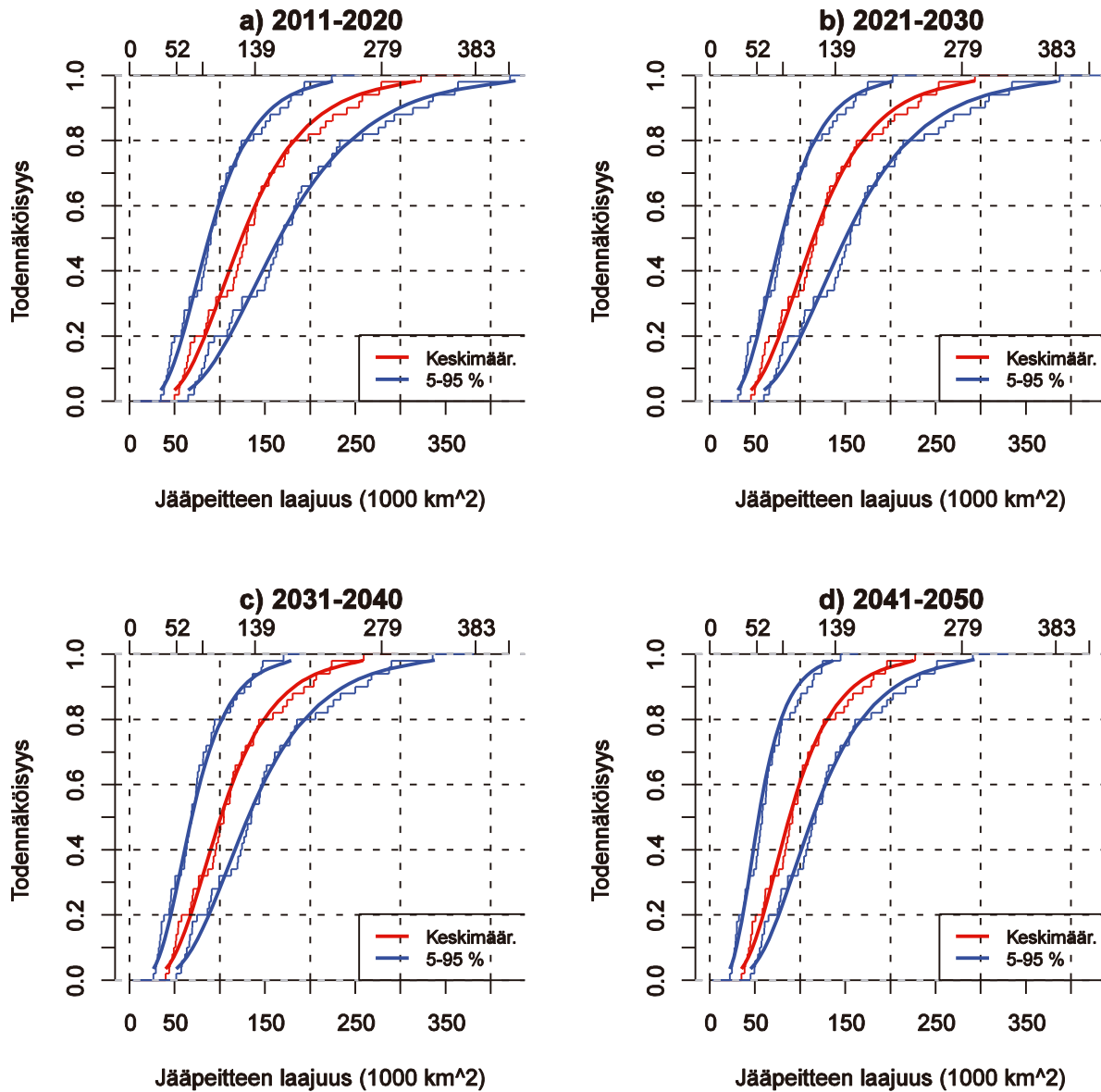


Kuva 8. Jääpeitteen laajuuden kertymätodennäköisyysjakauman muutos neljän vuosikymmenen aikana. Porrastettu käyrä on empiirinen kertymätodennäköisyys, tasainen käyrä on empiiriseen jakaumaan sovitettu teoreettinen kertymätodennäköisyys. Yläakselilla on esitetty jäätalvien ankaruusluokituksen mukaiset jään maksimilaajuuden luokkarajat (taulukko 1). Kuvassa oleva punainen pystyviiva on esimerkki kuvan tulkinnasta, kun jääpeitteen maksimilaajuus on $150 \cdot 10^3 \text{ km}^2$ (selitetty tekstissä).

Edellä esitetyt arviot kunkin vuosikymmenen jääpeitteen maksimilaajuuden jakaumalle kuvaavat siis tilannetta, jossa lämpötilaa on nostettu mallitulosten keskimäärin ennustamalla tavalla. Eri mallien antamat arviot poikkeavat kuitenkin toisistaan, ja tämän perusteella voidaan esittää mallien ennustamalle lämpötilan nousulle 5-95 % luottamusväli. Kuvassa 7 esitetyt laskelmat jäätalvien tilastollisen jakauman muuttumisesta toistettiin käyttäen lämpötilan nousulle luottamusvälin ala- ja yläarviota. Näin saadut jään laajuuden jakauman kertymäfunktio on esitetty kuvassa 9 sinisillä käyrillä. Kertymätodennäköisyyden käyrä kulkee siis 90 % todennäköisyydellä jossain näiden kahden sinisen käyrän välissä. On kuitenkin 5 % mahdollisuus, että ilmaston lämpeneminen onkin niin hidasta, että jääpeitteen maksimilaajuuden jakaumaa kuvaava käyrä kulkee jossain kuvien oikeanpuoleisen sinisen käyrän oikealla puolella. Vastaavasti on 5 % mahdollisuus, että lämpeneminen on niin voimakasta, että jääpeitteen maksimilaajuuden jakaumaa kuvaava käyrä jää kuvien vasemmanpuoleisten sinisten käyrien vasemmalle puolelle. Hitaankin lämpenemisen tapauksessa (kuvien 9 oikeanpuoleisin sininen käyrä) voidaan kuitenkin todeta, että jaksolla 2031-2040 (kuva 9c) ankarien jäätalvien todennäköisyys on noin 5-10 % ja jaksolla 2041-2050 enää muutama prosentti. Taulukossa 2 on esitetty todennäköisyyksille 20, 40, 60 ja 80 suurimman laajuuden paras arvio ja 90 % luottamusväli kullekin vuosikymmenelle. Tulokset perustuvat kuvaan 9.

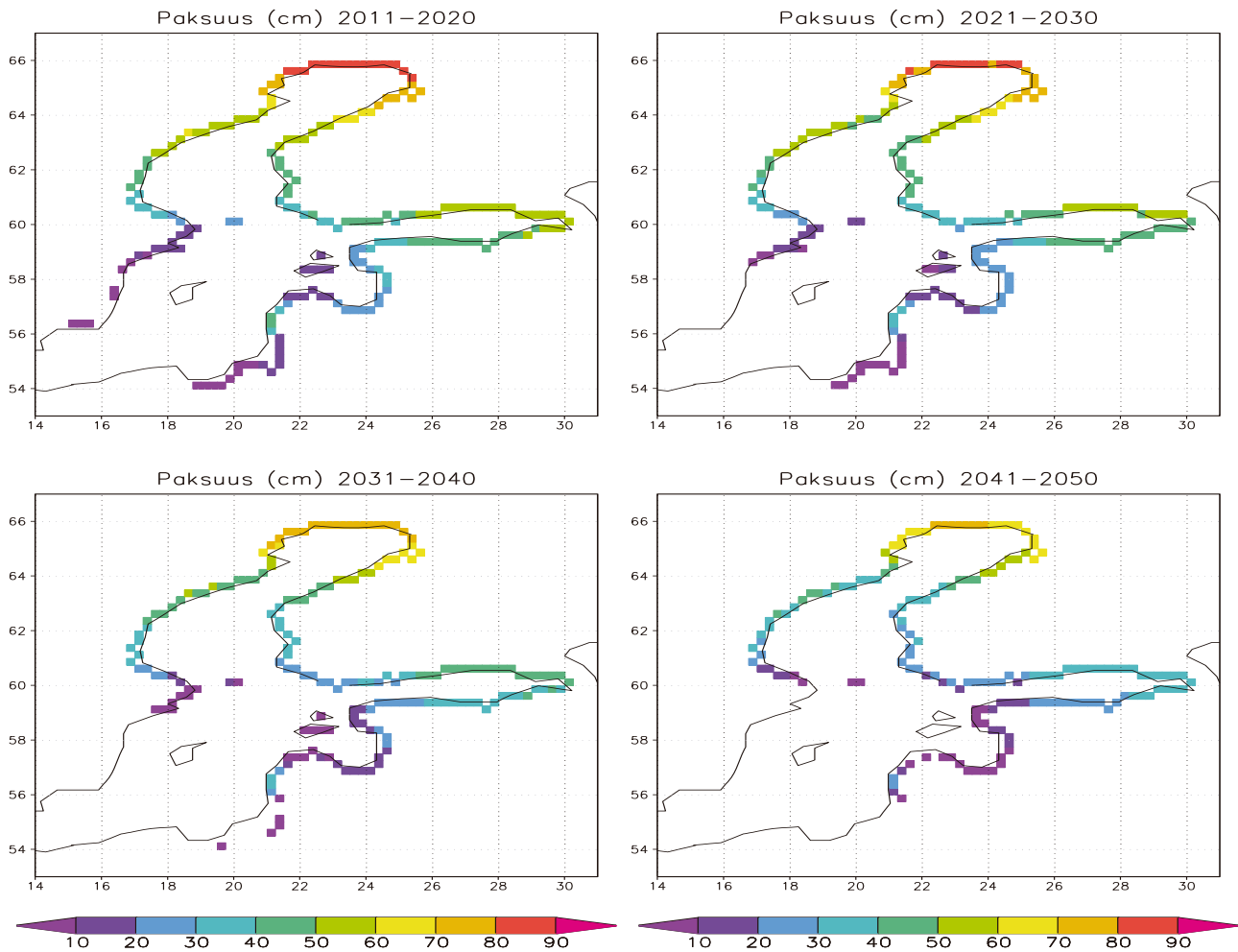
Taulukko 2. Jään enintään laajuuden (10^3 km^2) paras arvio (50 %) ja 90 % luottamusväli todennäköisyyksille 20, 40, 60 ja 80 %. Tiedot perustuvat kuvaan 9.

Toden- näk.	2011-2020		2021-2030		2031-2040		2041-2050	
	50 %	luotta- musväli	50 %	luotta- musväli	50 %	luotta- musväli	50 %	luotta- musväli
20	80	50-100	70	50-90	60	40-80	55	30-70
40	115	75-150	100	70-130	85	60-115	75	50-100
60	140	95-180	125	80-165	115	75-140	100	60-125
80	180	125-240	165	110-220	150	95-190	130	75-170



Kuva 9. Jään laajuuden kertymätodennäköisyyden luottamusvälit kullekin vuosikymmenelle: a) 2011-2020, b) 2021-2030, c) 2031-2040, d) 2041-2050, kun otetaan huomioon eri mallien ennustaman lämpötilan muutoksen erot. Punainen käyrä on keskimääräistä lämpenemistä vastaava jakauma, siniset käyrät rajaavat jakauman 90 % luottamusvälin. 90 prosentin todennäköisyydellä todellinen kertymäfunktio siis kulkee jossakin sinisten käyrien välillä.

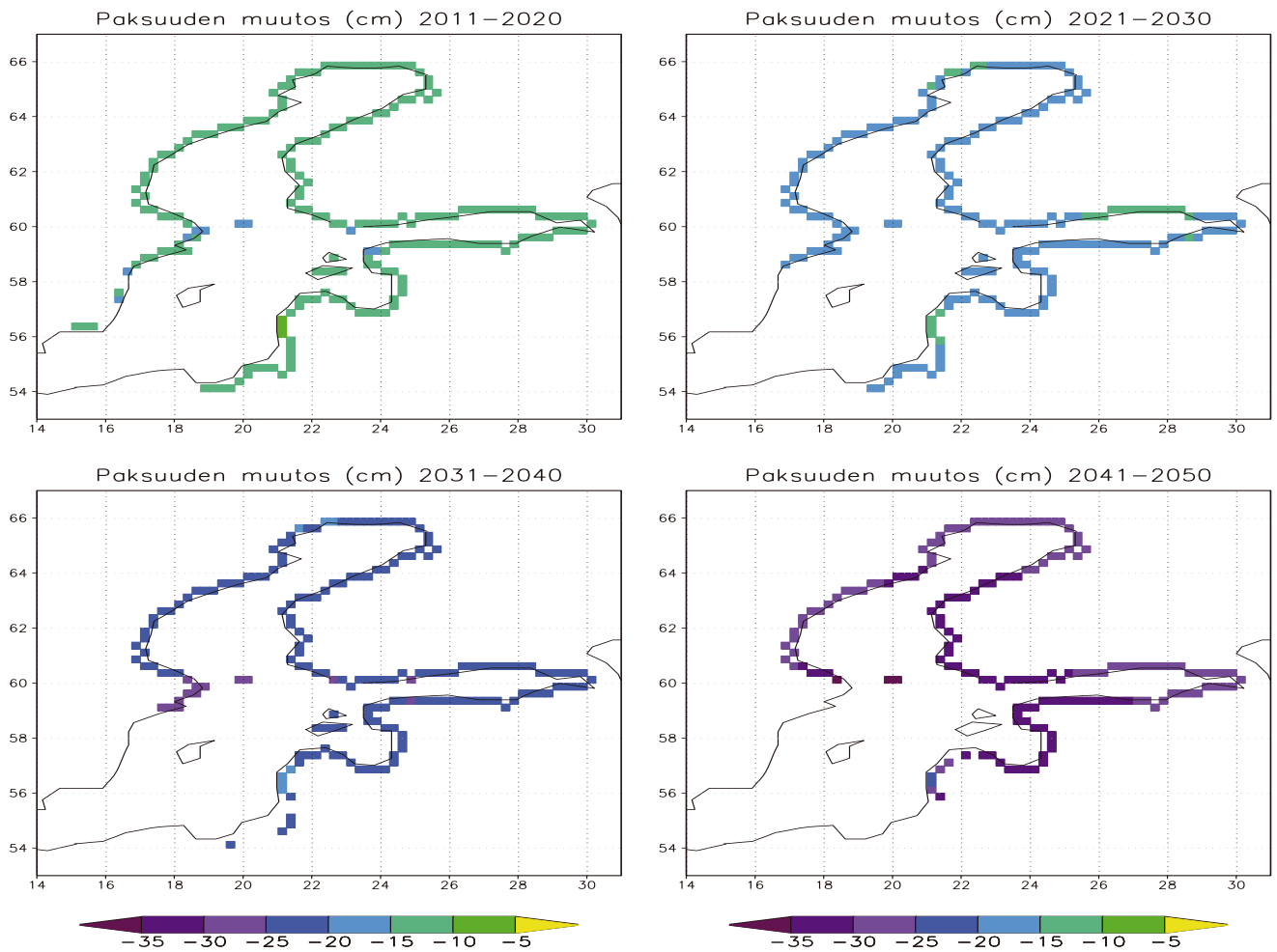
3.2. Jääpeitteen paksuuden muutos



Kuva 10. Arvioitu kiintojään keskimääräinen suurin paksuus kullakin vuosikymmenellä. a) 2011–2020, b) 2021–2030, c) 2031–2040, d) 2041–2050. Yksikkö cm.

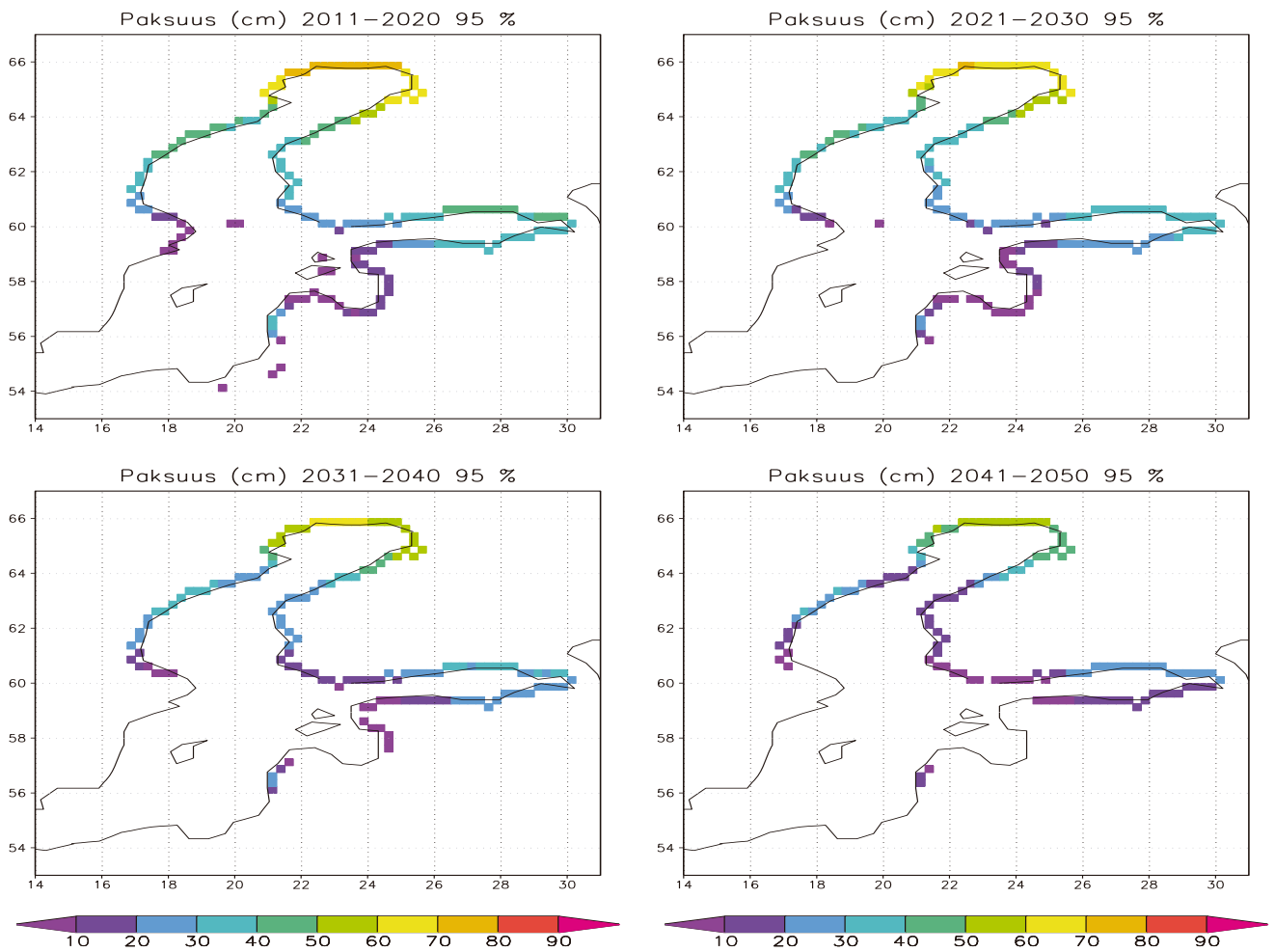
Kuten kappaleessa 2.3 todettiin, käytettävissä olevan säähavaintoaineiston perusteella voidaan arvioida jään paksuutta ainoastaan rannikon kiintojävyöhykkeellä. Tuloksia esitetään ainoastaan sääoloiltaan tyypilliselle talvelle kulloinkin vallitsevassa ilmastossa. Todellisuudessa jään paksuus tietysti vaihtelee vuosittain talven ankaruudesta riippuen.

Arvioitu kiintojään keskimääräinen suurin paksuus talven aikana tulevana vuosikymmeninä on esitetty kuvassa 10. 2010-luvulla (kuva 10a) jäätä on Perämeren pohjukassa jään ollessa paksuimmillaan keskimäärin 90 cm, eteläisellä Itämerellä 0–20 cm. Suomenlahdella jään paksuus vaihtelee 20 ja 60 cm välillä. Seuraavalla vuosikymmenellä (2021–2030, kuva 10b) Perämeren rannikolla jään paksuus ylittää vielä 80 cm, kun taas eteläisellä Itämerellä rannikkoalueet pysyvät jo paikoin jäättöminä. Seuraavina vuosikymmeninä (kuvat 10c ja 10d) Perämerelläkään ei enää esiinny jäätä yli 80 cm ja Suomenlahden rannikolla jäätä on noin 10–40 cm. Itämeren eteläisemmät alueet ja paikoin myös Pohjois-Itämeren länsiosan rannikot pysyvät normaalina talvena jäättöminä.



Kuva 11. Kunkin vuosikymmenen jään paksuuden muutos verrattuna jaksoon 1971-2000. a) 2011-2020, b) 2021-2030, c) 2031-2040, d) 2041-2050. Yksikkö cm.

Tulevien vuosikymmenien jään paksuutta on myös verrattu jakson 1971-2000 keskimääräiseen jään suurimpaan paksuuteen (kuva 11). Jaksolla 2011-2020 (kuva 11a) jäätä on pääosin 10-15 cm (10-50 %, lounaisilla alueilla prosentuaalinen ero on isompi) vähemmän kuin vertailujaksolla, jaksolla 2021-2030 (kuva 11b) ero on enimmäkseen 15-20 cm, jaksolla 2031-2040 (kuva 11c) 20-25 cm ja jaksolla 2041-2050 jäätä on vähintään 25 cm (20-80%, suurin prosentuaalinen ero lounaisilla alueilla) vähemmän kuin vertailujakson aikana.

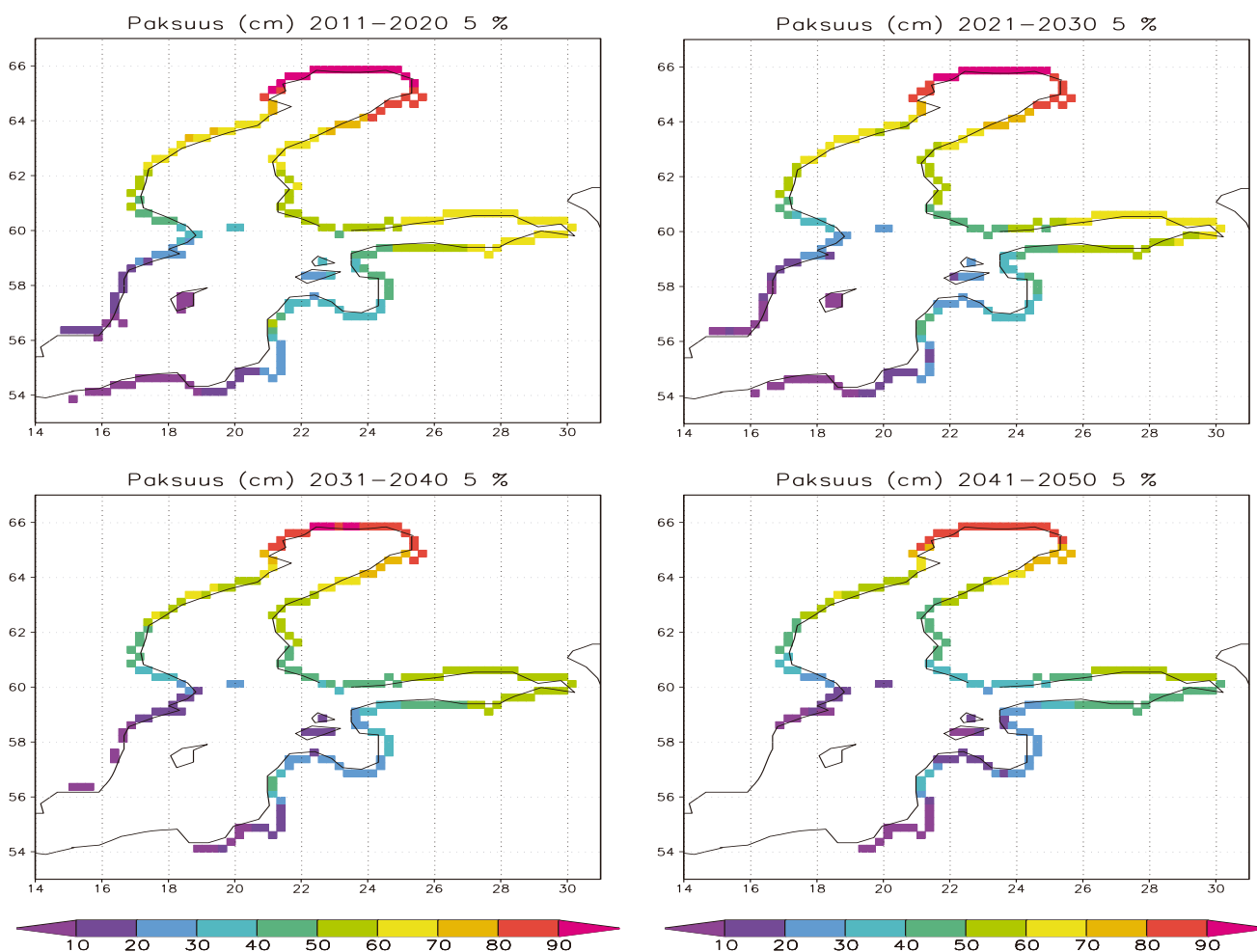


Kuva 12. Rannikkoalueiden maksimijäänpaksuuden epävarmuushaarukan alaraja kullekin vuosikymmenelle. Tätä voimakkaamman lämpenemisen ja jään ohenemisen todennäköisyys on mallitusten perusteella 5 %. a) 2011-2020, b) 2021-2030, c) 2031-2040, d) 2041-2050. Yksikkö cm.

Jään paksuuden muutoksille laskettiin myös luottamusväli. Luottamusvälin voimakasta muutosta vastaava raja kullekin vuosikymmenelle on esitetty kuvassa 12. Tätä suuremman lämpenemisen – ja siis jään ohenemisen – todennäköisyys on ilmastomallien tulosten perusteella enää 5 %. Jo jaksolla 2011-2020 (kuva 12a) Pohjois-Itämeren Ruotsin puoleinen rannikkoalue olisi näin voimakkaan lämpenemisen toteutuessa keskimääräisenä talvena jäätön, Perämeren pohjukassa jään paksuus olisi 60-80 cm. Vuoden 2040 jälkeen (kuva 12d) jäätä esiintyisi tässä tapauksessa lähinnä enää Pohjanlahdella ja Suomenlahdella, Suomenlahdella paikoin alle 10 cm.

Luottamusvälin heikkoa muutosta vastaava pää (kuva 13) kertoo vastaavasti jään paksuuden, jos lämpeneminen – ja jään paksuuden oheneminen – on niin hidasta, että todennäköisyys vielä tätä hitaammalle muutokselle on 5 %. Selkeitä muutoksia alkaa nyt näkyä vasta vuoden 2030 jälkeen (kuva 13c). Tällöin Itämeren eteläisin osa alkaisi olla jäätön ja Suomenlahdellakin jää on ohentunut. Jaksolla 2041-2050 (kuva 13d) jään oheneminen jatkuu, mutta jäätön alue ei kovin paljon pohjoisemmaksi leviä.

Kuvissa 12-13 esitetyn epävarmuusanalyysin perusteella voidaan siis todeta, että 90 % todennäköisyydellä jään paksuus Suomeen rajautuvilla merialueilla on jaksolla 2011-2020 0-30 cm (0-60 %) pienempi kuin vertailujaksolla 1971-2000. Jakson 2021-2030 aikana ero on 0-40 cm (0-75 %), jakson 2031-2040 5-40 cm (5-85 %) ja jakson 2041-2050 10-50 cm (10-90 %). Suurin prosentuaalinen muutos tapahtuu lounaisilla merialueilla. Paras arvio jääpeitteen maksimipaksuudeksi tulevana vuosikymmeninä on kuitenkin esitetty kuvassa 10. Näiden tulosten osalta on muistettava, että laskennassa käytetty yhtälö (luku 2.3) ei ota huomioon jään päällä olevaa lumikerrosta, joka hidastaisi jään paksuuskasvua. Esitetyt jään paksuudet ovat siis kauttaaltaan noin 10-20 cm liian suuria. Toisaalta ilmaston lämmetessä myös lumikerros ohenee.

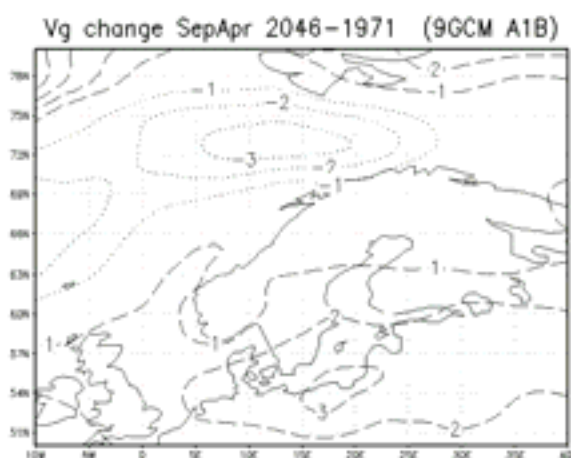


Kuva 13. Rannikkoalueiden maksimijäänpaksuuden epävarmuushaarukan yläraja kullekin vuosikymmenelle. Tätä hitaamman lämpenemisen ja jään ohenemisen todennäköisyys on mallitulosten perusteella 5 %. a) 2011-2020, b) 2021-2030, c) 2031-2040, d) 2041-2050. Yksikkö cm.

Laskelmissa ei ole myöskään otettu huomioon meren lämpövaraston muutosta ja sen mahdollista vaikutusta jään paksuuteen. On hyvin oletettavaa, että kesän ja syksyn lämpeneminen lisää meren pintakerrokseen sitoutunutta lämpövarastoa tulevaisuudessa. Tämä viivästyttäisi meriveden jäähtymistä ja jääkannen muodostumista ja siten vähentäisi myös merijään maksimijäänpaksuutta. Meren lämpövaraston muutos on erityisen tärkeä tekijä ulappa-alueilla.

3.3. Tuulisuuden, ahtojääolojen ja jään puristavuuden muutokset

Yhdeksän maailmanlaajuisen ilmastomallin tulosten mukaan pinnan geostrofinen tuuli ja sitä kautta tuulisuus merellä tulevat muuttumaan (Gregow ja Ruosteenoja, 2010). Geostrofinen tuuli kuvaa ilmanpaine-erosta johtuvaa tuulta, jonka laskemisessa maanpinnan kitkaa ei ole otettu huomioon. Näillä näkymin on hyvin todennäköistä, että tuulisena vuodenaikana (syyskuu-huhtikuu) erityisesti Itämeren eteläosissa tuulen nopeudet kasvavat, vaikkakin vain 2-3 % (kuva 14). Suurimmat muutokset tapahtunevat talvikuukausina. Eteläisellä Itämerellä (55°N, 15°E) ja Suomenlahdella kuukauden keskituulen nopeus voi kasvaa 2-6 %. Voimakkain kasvu osuu tulosten mukaan marraskuulle ja helmikuulle (taulukko 3), joskin tämä päätelmä on aika epävarma mallien pienen lukumäärän takia.



Kuva 14. Yhdeksän maailmanlaajuisen ilmastomallin keskiarvoa vastaava muutos tuulen voimakkuudessa syys-huhtikuussa A1B-skenaarion mukaan, kun verrataan perusjaksoa 1971-2000 jaksoon 2046-2065. Harmaalla varjostetulla alueella muutos on tilastollisesti merkitsevä 5 % tasolla. Positiiviset muutokset on merkitty katkoviivoin ja negatiiviset pistein.

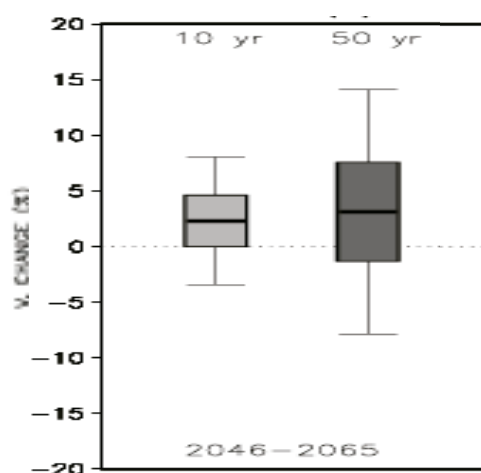
Taulukko 3. Keskimääräisen tuulen nopeuden muutos vuoden eri kuukausina Suomenlahdella (60°N, 25°E) ja eteläisellä Itämerellä (55°N, 15°E) vertailtaessa 2046-2065 jakson tuulia perusjaksoon 1971-2000.

Sijainti	Kuukausi ja tuulen voimakkuuden keskimääräinen muutos A1B-skenaarion toteutuessa											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
60°N, 25°E	2 %	3 %	-2 %	-1 %	0 %	2 %	0 %	-1 %	3 %	2 %	6 %	1 %
55°N, 15°E	3 %	5 %	0 %	-1 %	1 %	4 %	-3 %	-1 %	0 %	4 %	6 %	2 %

Arvioimalla 10- ja 50-vuoden toistuvuustasolla esiintyviä kovia tuulia, havaitaan, että myös näissä äärituulissa on odotettavissa muutoksia (kuva 15). Kun tarkastellaan vain eteläisen Itämeren pistettä 55°N, 15°E havaitaan, että noin 75 % todennäköisyydellä nämä kerran kymmenessä tai

kerran 50 vuodessa puhaltavat voimakkaimmat tuulet muuttuvat jonkin verran voimakkaammiksi ja niitä esiintyy hieman useammin kuin perusjakson 1971-2000 aikana.

Marraskuussa Itämeri on vielä pääosin avoin, mutta helmikuussa jääpinta on jo lähestulkoon laajimmillaan. Tuulisuuden muutoksien vaikutusta jääoloihin ei ole vielä tutkittu, mutta voidaan arvioida, että tuulisuuden lisääntyminen varsinkin kevättalvella johtaa lisääntyneeseen jään liikkeeseen ja ahtojään muodostumiseen. Arvioitu muutaman prosentin muutos tuskin kuitenkaan merkittävästi lisää ahtojään määrää. Jään puristavuus riippuu jään paksuudesta ja liikkeestä. On oletettavaa, että voimakkaita puristustilanteita ei tule tulevina leutoina talvina esiintymään kovin usein, vaikka tuulet hieman voimistuvatkin. Huomattakoon myös, että tuulet näyttävät voimistuvan eniten Itämeren eteläosissa, missä jäätä varsinkin tulevaisuudessa esiintyy vain harvoin.



Kuva 15. Eteläisellä Itämerellä pisteessä 55°N , 15°E kerran 10:ssä (vaalea pylväs) ja kerran 50:ssä (tumma pylväs) vuodessa esiintyvän kovan tuulen voimakkuuden muutos siirryttäessä jaksosta 1971-2000 jaksoon 2046-2065. Pylvään keskellä oleva viiva kuvaa mallitulosten keskiarvoa. Leveä pylväs esittää mallien perusteella saatua muutoksen 25-75 % todennäköisyysväliä, ja 5-95 % todennäköisyysväliä.

4. Yhteenveto

Itämeren jääpeitteen kevättalvisen maksimilaaajuuden jakaumaa vuoteen 2050 mennessä arvioitiin ilmastomallitulosten ja regressiomallin avulla. Saatujen tulosten mukaan jääpeitteen maksimilaaajuus ja ankarien jäätalvien todennäköisyys tulevat pieneneväseen. Ankarat jäätalvet muuttuvat harvinaisiksi vuoden 2030 jälkeen, ja vuoden 2040 jälkeen niitä ei juuri enää esiinny. Vastaavasti leutojen ja hyvin leutojen jäätalvien osuus kasvaa.

Rannikkoalueiden suurinta keskimääräistä jään paksuutta arvioitiin talven pakkassumman avulla. Jään suurin paksuus tulee ilmaston lämmetessä ohenemaan. Vuoden 2020 jälkeen keskimääräinen jään paksuus on noin 15-20 cm (noin 15-60 %) pienempi kuin jaksolla 1971-2000. Vuoden 2040 jälkeen jää ohentuisi jo noin 25-35 cm (20-80 %). Itämeren eteläosista jää hävinnee kokonaan. On kuitenkin muistettava, että jääpeitteen suurimman paksuuden arviointiin käytetty mene-

telmä yliarvioi jään paksuutta noin 10-20 cm jättämällä jään päällä olevan lumipeitteen eristävän vaikutuksen ja meren lämpövaraston muutoksen huomioimatta.

Tuuliolojen muutoksia Itämerellä on tutkittu yhdeksän maailmanlaajuisen ilmastomallin avulla. Tulosten mukaan tuulet tulevat voimistumaan syksyllä ja talvella muutaman prosentin. Sillä ei luultavasti ole kovin suurta vaikutusta jäiden liikkeeseen ja ahtojään muodostukseen. Talvien selvä leudontuminen sen sijaan helpottanee jääoloja tässäkin suhteessa. Tarkemmin asiaa ei kuitenkaan ole vielä pystytty tutkimaan.

5. Viitteet

- BACC Author team, 2008: Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin Series, Regional Climate Studies, Springer, ISBN: 978-3-540-72785-9, 474p.
- Coles, S., 2001: An introduction to statistical modeling of extreme values. Springer-Verlag, London, UK. 204 s.
- Gregow H., Ruosteenoja, K. 2010: The mean, maximum and extreme geostrophic wind speeds in Northern Europe in 1971-2100 based on nine global climate models (in preparation)
- Haylock, M. R., N. Hofstra, A. M. G. Klein Tank, E. J. Klok, P. D. Jones, M. New, 2008: A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J. Geophys. Res. (Atmospheres)*, 113, D20119.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p.
- Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Ruokolainen, L., Saku, S. ja Seitola, S., 2009: Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumis-tutkimuksia varten. ACCLIM-hankkeen raportti 2009 (The changing climate in Finland: estimates for adaptation studies. ACCLIM project report 2009.) Ilmatieteen laitos, Raportteja 2009:4, 102 s. In Finnish, abstract, extended abstract and captions for figures and tables also in English)
- Leppäranta, M. 1993: A Review of Analytical Models of Sea-Ice Growth. *Atmosphere-Ocean*, 31.
- Seinä A. and E. Palosuo (1996): The classification of the maximum annual extent of ice cover in the Baltic Sea 1720-1995. *Meri, Report Series of the Finnish Inst. Of Marine Res.*, 20, 79-910.

RAPORTTEJA — RAPPORTER — REPORTS

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

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

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

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

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

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

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

6. Paatero, Jussi et al., 2008. Effects of Kola air pollution on the environment in the western part of the Kola peninsula and Finnish Lapland : final report. 26 p.
- 2009
1. Nevanlinna, H., 2009. Geomagnetismin ABC-kirja. 204 s.
 2. Nevanlinna, H. (toim.), 2009. Ilmatieteen laitos 170 vuotta, 1838 - 2008. 69 s.
 3. Nevanlinna, Heikki, 2009. Revontulihavainnot Suomessa 1748 – 2009. 88 s.
 4. Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Ruokolainen, L., Saku, S. ja Seitola, T., 2009. Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten. ACCLIM-hankkeen raportti 2009. 102 p.
 5. Mäkelä, Antti & Tuomi, Tapio, J., 2009. Salamahavainnot 2009 – Lightning observations in Finland, 2009. 51 p.
 6. Verronen, Pekka (ed.), 2009. 5th International Atmospheric Limb Conference and Workshop : Book of abstracts. 92 p.
 7. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2009. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2008. 48 p.
 8. Kersalo, Juha and Pirinen, Pentti (eds), 2009. Suomen maakuntien ilmasto. 185 s.
- 2010.
1. Rauhala, Jenni & Mäntyniemi, Päivi, 2010. Luonnononnettomuuksien vaikutus ja niihin vaikuttaminen. (valmisteilla).
 2. Pilli-Sihvola, K. Löwendahl, E., Ollikainen, M., van Oort, B., Rummukainen, M. & Tuomenvirta, H., 2010. Survey on the use of climate scenarios and climate change research information in decision making in Finland, Sweden and Norway. Report for the project Climate change adaption in Norway, Sweden and Finland – do research, policy and practice meet? (CAREPol). 57 p.
 3. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2010. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2009. 48 p.
 4. Luomaranta, A., Haapala, J., Gregow, H., Ruosteenoja, K., Jylhä, K. and Laaksonen, A. 2010. Itämeren jääpeitteen muutokset vuoteen 2050 mennessä. 23 s.
 5. Mäkelä, Antti, 2010. . Salamahavainnot 2010 – Lightning observations in Finland, 2010. 50 p.

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

ISBN 978-951-697-735-8 (nid.)
ISSN 0782-6079
Yliopistopaino
Helsinki 2010