



Antti Martikainen

Ilmastonmuutoksen vaikutus sähköverkkoliiketoimintaan

Ilmastonmuutoksen vaikutus sähköverkkoliiketoimintaan

Antti Martikainen

ISBN 951-38-6789-7 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2006

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 3, PL 1000, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 3, PB 1000, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 3, P.O.Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax + 358 20 722 4374

VTT, Biologinkuja 7, PL 1000, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 7026

VTT, Biologgränden 7, PB 1000, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 7026

VTT Technical Research Centre of Finland, Biologinkuja 7, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7026

Martikainen, Antti. Ilmastonmuutoksen vaikutus sähköverkkoliiketoimintaan [Impacts of climate change on electricity network business]. Espoo 2006. VTT Tiedotteita – Research Notes 2338. 74 s. + liitt. 5 s.

Avainsanat electricity network business, climate change, extreme events

Tiivistelmä

Ilmasto asettaa tiettyjä vaatimuksia sähköverkkoliiketoiminnalle. Sähköverkko joutuu kohtaamaan jatkuvasti ilmastollisia rasituksia, ja se onkin suunniteltu ja rakennettu kestämään normaalit rasitukset. Nyt suunniteltu ja rakennettu verkko voi olla toiminnassa seuraavat 40 vuotta. Jos ilmaston aiheuttamat rasitukset muuttuvat tänä aikana, voi sillä olla merkittäviä vaikutuksia sähköverkkoliiketoiminnalle. Selvittämällä ilmastonmuutoksen vaikutuksia etukäteen voidaan vaikutuksiin varautua, ja näin ilmastonmuutoksen kielteisiä vaikutuksia kyetään mahdollisuuksien mukaan pienentämään ja myönteisiä asioita hyödyntämään.

Tässä työssä tutkittiin ilmastonmuutoksen vaikutuksia sähköverkkoliiketoimintaan. Ilmastonmuutosennusteet laadittiin RCAO-ilmastomallin antamien laskelmien perusteella. Ilmastomuuttujien ennusteet tehtiin ajanjaksolle 2016–2045 ja ennusteiden vertailujaksona käytettiin ajanjaksoa 1960–1990. Ennusteet laadittiin sadannalle, lämpötilalle, kuuraantumiselle, hurteelle, ukkoselle, routaantumiselle ja tuulisuudelle. Ilmastomuuttujien vaikutukset arvioitiin sekä tekniseltä että taloudelliselta kannalta.

Ilmastomallien antamien ennusteiden mukaan maapallon ilmasto tulee muuttumaan voimakkaasti tämän vuosisadan aikana, ja ilmastomallien mukaan ilmastonmuutos tulee näkymään selvästi myös Suomessa jo seuraavan 40 vuoden aikana. Ilmastonmuutoksen myötä on odotettavissa, että ilmastomuuttujien aiheuttamat rasitukset verkkoliiketoimintaa kohtaan tulevat olemaan niistä saatuja hyötyjä suuremmat. Vikamäärien kasvu on merkittävin ja haastavin ilmastonmuutoksen aiheuttama haitta. Ukkonen, lumikuormat ja tuuli tulevat aiheuttamaan nykyistä enemmän vikoja erityisesti keskijänniteverkoissa avojohdoille, ellei verkkoja kehitetä vikavarmemmiksi. Lämpötilan nousun seurauksena lämmitystarve laskee ja jäähdystarve nousee. Tämä näkyy merkittävimmin voimakkaasti lämpötilariippuvaisten käyttäjryhmien sähkönkulutuksessa ja huippukuormissa.

Martikainen, Antti. Ilmastonmuutoksen vaikutus sähköverkkoliiketoimintaan [Impacts of climate change on electricity network business]. Espoo 2006. VTT Tiedotteita – Research Notes 2338. 74 p. + app. 5 p.

Keywords electricity network business, climate change, extreme events

Abstract

Climate has a significant impact on the electricity network business. The electricity network is under the weather pressure all the time and it is planned and constructed to withstand normal climatic stresses. The electricity network that has been planned and constructed now, is expected to be in operation next 40 years. If climatic stresses change in this period, it can cause significant impacts on electricity network business. If the impacts of climate change are figured out in advance, it is possible to mitigate negative points of climate change and exploit the positive points.

In this paper the impact of climate change on electricity network business is presented. The results are based on RCAO climate model scenarios. The climate predictions were composed to the period 2016–2045. The period 1960–1990 was used as a control period. The climate predictions were composed for precipitation, temperature, hoarfrost, thunder, ground frost and wind. The impacts of the change of the climate variables on electricity network business were estimated from technical and economical points of view. The estimation was based on the change predictions of the climate variables.

It is expected that climate change will cause more damages than benefits on the electricity network business. The increase of the number of network faults will be the most significant and demanding disadvantage caused by climate change. If networks are not improved to be more resistant for faults, then thunder, heavy snow and wind cause more damages especially to overhead lines in medium voltage network. Increasing precipitation and decreasing amount of ground frost weaken the strength of soil. The construction work will be more difficult with the present vehicles because wet and unfrozen ground can not carry heavy vehicles. As a consequence of increasing temperature, the demand of heating energy will decrease and the demand of cooling energy will increase. This is significant for the electricity consumption and the peak load of temperature-dependent electricity users.

Alkusanat

Tämä tutkimus toteutettiin Teknologian kehittämiskeskuksen (Tekes), Suomen ympäristökeskuksen (SYKE); Finadapt konsortion, VTT:n perusrahoituksen sekä yksityisten rahoittajien rahoittamana. Projektipäällikkönä toimi ryhmäpäällikkö Osmo Auvinen ja työn toteutuksesta vastasi tutkija Antti Martikainen.

Tutkimus toteutettiin VTT Prosessit -yksikössä ja projektin johtoryhmään kuuluivat Tekes; Jari Eklund, SYKE, Finadapt konsortio; Tim Carter, Fingrid; Jarmo Elovaara, Katariina Ojanen, Technopolis; Jatta Jussila, VTT; Osmo Auvinen, Hannele Holttinen.

Haluan kiittää johtoryhmää rakentavista kommentteista ja lisäksi haluan kiittää Fingrid Oyj:tä ja Fortum sähkönsiirto Oy:tä kaikista saamistani tiedoista.

Espoossa, joulukuussa 2005

Antti Martikainen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
1. Johdanto.....	9
2. Sähköverkkoliiketoiminta.....	11
3. Sähköverkko.....	13
3.1 Kantaverkko.....	13
3.2 Jakeluverkko.....	15
3.2.1 1000 Voltin järjestelmä.....	16
4. Ilmastonmuutos.....	17
4.1 Kuvaus ilmastonmuutoksesta.....	17
4.2 Ilmastonmuutoksen ennustaminen.....	20
4.3 Havaitut muutokset Suomessa.....	21
4.4 Näkemyksiä ääri-ilmiöiden lisääntymisestä.....	23
5. Ilmastomallit.....	24
5.1 Kuvaus ilmastomalleista.....	24
5.2 Ennusteiden laadinnassa käytetyt ilmastomallit.....	25
5.3 Ilmastomallien epävarmuustarkastelu.....	25
6. Muutosennusteet.....	28
6.1 Sadanta.....	28
6.2 Lämpötila.....	32
6.3 Tulvat ja maankosteus.....	37
6.4 Merenpinnan nousu.....	37
6.5 Kuura ja huurre.....	38
6.6 Ukkonen.....	40
6.7 Routa.....	42
6.8 Tuuli.....	43
6.9 Yhteenvedo ennusteista.....	48
7. Ilmastonmuutoksen vaikutukset.....	50
7.1 Sadanta.....	50
7.2 Lämpötila.....	52

7.3	Kuura ja huurre.....	55
7.4	Ukkonen	55
7.5	Routa	57
7.6	Tuuli	58
7.7	Esimerkki ilmastonmuutoksen vaikutuksista	60
8.	Ilmastonmuutoksen merkitys	65
8.1	Verkostosuunnittelu.....	65
8.2	Verkoston rakentaminen.....	66
8.3	Verkoston kunnossapito	66
8.4	Verkkoliiketoiminnan tulot	67
9.	Yhteenveto	69
	Lähdeluettelo	71
Liitteet		
	Liite A: Sähkönkulutuksen ja huipputehon muutokset käyttäjäryhmittäin	
	Liite B: Laskentaesimerkki luvussa 7.7 esitettyyn esimerkkiin ilmastonmuutoksen vaikutuksista	

1. Johdanto

Maapallon ilmaston ennustetaan muuttuvan voimakkaasti tämän vuosisadan aikana, ja ilmastomallien antamien ennusteiden mukaan ilmastomuuttujien muutokset tulevat näkymään selvästi myös Suomessa. Ilmastonmuutos on tällä hetkellä aiheena ajankohtainen, ja ilmastomuutoksen vaikutuksia tutkitaan hyvin laajasti. Tämä tutkimus on kuitenkin ensimmäisiä lajissaan, sillä ilmastomuutoksen vaikutuksia sähköverkkoihin ei ole vielä juurikaan tutkittu.

Ilmasto asettaa tiettyjä vaatimuksia sähköverkkoliiketoiminnalle. Sähköverkko joutuu kohtaamaan jatkuvasti ilmastollisia rasituksia, ja se onkin suunniteltu ja rakennettu keskimääräisiin normaaliin rasitukseen. Nyt suunniteltu ja rakennettu verkko voi olla toiminnassa seuraavat 40 vuotta. Jos ilmaston aiheuttamat rasitukset muuttuvat tänä aikana, voi sillä olla merkittäviä vaikutuksia sähköverkkoliiketoiminnalle. Selvittämällä ilmastomuutoksen vaikutuksia etukäteen voidaan vaikutuksiin varautua, ja näin ilmastomuutoksen kielteisiä vaikutuksia kyetään mahdollisuuksien mukaan pienentämään ja myönteisiä asioita hyödyntämään.

Suomessa on koettu sääilmiöiden aiheuttamia laajoja sähkökatkoja ja näiden seurauksena on alettu keskustella ennen kaikkea myrskytuhoihin varautumisesta. Kauppa- ja teollisuusministeriö teki vuonna 2002 selvityksen sähköjakelun turvaamisesta myrskyjen sattuessa. Sen mukaan kohtuullisena sähköjakelun katkona pidettiin 12 tuntia, minkä jälkeen asiakkaalla on oikeus hakea korvauksia. Tämä on selvä merkki yhteiskunnan puolelta verkkoyhtiöille: sähköä on oltava ja sen laadun on oltava korkeatasoista. Toimitusvarmuutta halutaan saada paremmaksi myös tilanteissa, joissa syynä on sääilmiö.

Sähkötoimituksen keskeytymättömyyttä ei kuitenkaan voida nykytekniikalla koskaan taata, vaan asiakkaan tulee itse varautua mahdollisiin keskeytyksiin tarpeidensa mukaisesti. Varalämmitysjärjestelmän pakollisuutta on mietitty pientaloihin, mutta varsinaista pakkoa ei ole vielä määrätty. Haja-asutusalueille rakennettaessa suositellaan rakentamaan varalämmitysjärjestelmä, eli yleensä tulisija. Viimeaikaisten myrskyjen jälkeen on moniin maataloihin hankittu varavoimajärjestelmiä, joita ovat tavallisesti traktorilla pyöritettävät aggregaatit. Sairaaloissa ja monissa tuotantolaitoksissa on varavoimajärjestelmiä käytetty jo pitempään takaamaan keskeytymätön sähkötoimitus.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on muodostaa kokonaiskuva ilmastomuutoksesta ja sen vaikutuksista sähköverkkoon ja -liiketoimintaan. Ilmastonmuutoksen vaikutuksia tarkastellaan sekä tekniseltä että taloudelliselta kannalta. Tavoitteena on ottaa huomioon ne ilmastomuuttujien muutokset, jotka vaikuttavat sähköverkkoliiketoimintaan.

Tutkimuksen tarkastelualueeksi on rajattu sähköverkkoliiketoiminta Suomessa. Ilmas-
tonmuutoksen vaikutus energian tuotantoon tai sähkön loppukäyttöön on jätetty työn
tarkastelualueen ulkopuolelle.

2. Sähköverkkoliiketoiminta

Sähköverkkoliiketoiminta on luvanvaraista monopolitoimintaa johtuen sähköverkkojen luonteesta luonnollisina monopoleina. Sähköverkkojen investointikustannukset ovat korkeat, jolloin rinnakkaisten verkkojen rakentaminen ei ole taloudellisesti järkevää eikä myöskään ympäristön kannalta suotavaa. Energiamarkkinavirasto valvoo siirtohinnoittelun kohtuullisuutta, josta seuraa, että tuotto on säädeltyä, mutta toisaalta vakaata. Valvonnalla pyritään myös kannustamaan verkkoyhtiöitä tehostamaan toimintaansa ja varmistamaan asiakkaiden oikeuksien toteutuminen.

Kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj vastaa sähkömarkkinalain velvoittamana sähköjärjestelmän toimivuudesta valtakunnan tasolla. Fingrid Oyj on vuonna 1996 perustettu yritys, jonka omistuksessa on kantaverkko ja kaikki merkittävät ulkomaanyhteydet. Yhtiön asiakkaina toimii sähköntuottajia, suurteollisuusyrityksiä sekä alue- ja jakeluverkonhaltijoita.

Sähköverkkoliiketoiminnasta jakeluverkoissa vastaavat verkkoyhtiöt, joilla on sähköverkkoliiketoimintaan oikeuttava sähkömarkkinaviranomaisen myöntämä verkkolupa. Suomen jakeluverkkoyhtiöt toimivat hyvin erilaisissa ympäristö-olosuhteissa, ja yhtiöt eroavat toisistaan myös liiketoimintamallien, koon ja omistajuuden suhteen. Joukossa on yhtiöitä julkisista osakeyhtiöistä kuntien liikelaitoksiin. (Järventausta et al. 2004)

Kaikille verkkoyhtiöille on säädetty samat velvollisuudet sähkömarkkinalaissa. Verkkoyhtiöiden perustehtävänä on toimittaa sähköä asiakkaille ja muodostaa markkinapaikka sähkökaupalle. Verkkoyhtiön tulee ylläpitää hallitsemaansa sähköverkkoa, jotta sähköntoimitus on sähkömarkkinalain (386/1995) mukainen. Verkoston ylläpidolla varmistetaan luotettava sähkön toimitus, häiriötilanteiden ennakointi ja hallinta. Lisäksi verkkoyhtiöiden tehtäviin kuuluu verkon kehittäminen. Verkkoyhtiöiden velvoitteilla varmistetaan riittävän hyvänlaatuinen sähkön toimitus.

Sähkömarkkinalaki määrää, että asianmukaista korvausta vastaan on verkonhaltijoiden avattava verkkonsa kaikkien halukkaiden käyttöön. Sähkön siirron ja jakelun hinnoittelussa sovelletaan pistehinnoittelua. Tämän mukaan sähkön käyttäjällä on mahdollisuus hankkia tarvitsemansa sähkö mistä tahansa Suomen alueelta. Tietyn jakeluverkon alueella kaikki samantyyppiset käyttäjät maksavat sähkön siirrosta saman hinnan, joka kattaa koko siirtoketjun. Siirtohinna muodostuu kantaverkko-, alueverkko- ja jakeluverkko-siirrosta, siirtohinnan yhteydessä kerättävästä sähköverosta ja kaikille näille laskettavasta arvonnalisäverosta.

Sähkönjakeluverkkoliiketoiminta on sekä teknisestä että taloudellisesta näkökulmasta merkittävä liiketoiminta-alue. Sähkön hinnasta yli puolet koostuu sähkön siirrosta jakeluverkoissa, ja sähkön kuluttajien kokemista keskeytyshaitoista yli 90 % aiheutuu säh-

könjakeluverkon vioista, joista noin 80 % on keskijänniteverkon vikoja. Lisäksi jännitteen laatu asiakkaiden liittymispisteissä määräytyy pääosin sähkönjakeluverkon ominaisuuksien perusteella. Myös mahdolliset puutteet jakeluverkkojen turvallisuudessa ovat aina merkittävä riskitekijä ympäristölleen, koska jakeluverkot sijaitsevat laajasti muun yhdyskuntatekniikan keskellä. (Partanen et al. 2004)

Sähkönkäyttäjällä on oikeus vakiokorvauksiin, kun sähkön toimitus on yli 12 tuntia keskeytynyt. Vakiokorvauksen määrä on sähkönkäyttäjän vuotuisesta verkkopalvelu- eli siirtomaksusta:

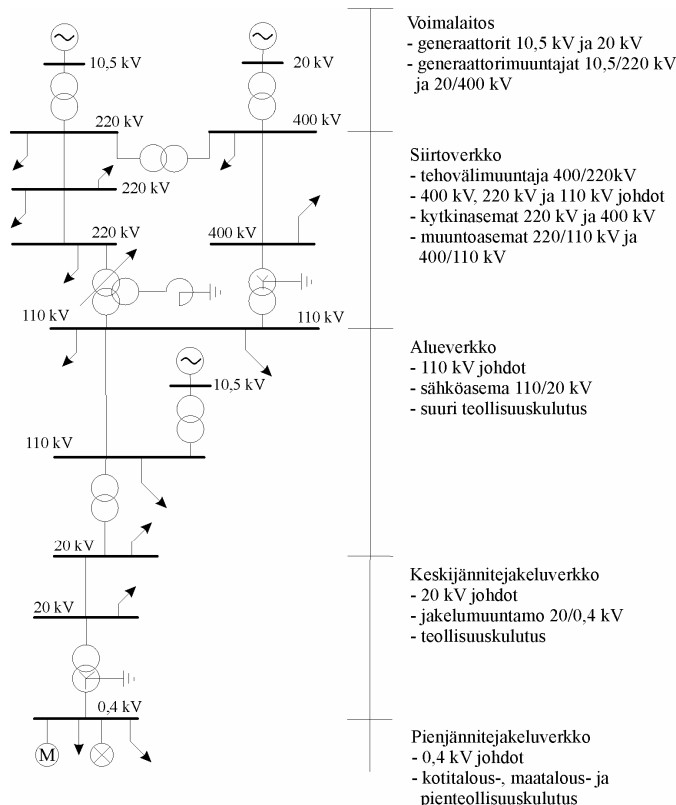
- 10 prosenttia, kun keskeytysaika on ollut vähintään 12 tuntia mutta vähemmän kuin 24 tuntia
- 25 prosenttia, kun keskeytysaika on ollut vähintään 24 tuntia mutta vähemmän kuin 72 tuntia
- 50 prosenttia, kun keskeytysaika on ollut vähintään 72 tuntia mutta vähemmän kuin 120 tuntia
- 100 prosenttia, kun keskeytysaika on ollut vähintään 120 tuntia.

Vakiokorvauksen enimmäismäärä verkkopalvelun keskeytymisen vuoksi on rajattu 700 €:oon sähkönkäyttäjää kohti. (Finlex 2005)

Verkkoyhtiöt maksavat vakiokorvauksia sähkökatkon piiriin joutuneille asiakkaille, riippumatta siitä, kärsivätkö he katkosta vai eivät. Yksittäiselle sähkönkäyttäjälle tuleva korvaus voi vaikuttaa pieneltä, mutta laajoissa suurhäiriöissä nousee verkkoyhtiön korvausvelvollisuus huomattavan suureksi. Esimerkiksi Fortum maksoi joulukuussa 2004 riehuneen Rafael-myrskyn jäljiltä vakiokorvauksia noin 1,5 milj. €.

3. Sähköverkko

Sähköverkon tehtävänä on yhdistää sähkön tuotanto ja kulutus siten, että tehotasapaino säilyy joka hetki. Suomen sähköverkko muodostuu kanta-, alue- ja jakeluverkostosta. Verkoston periaatteellinen rakenne on esitetty kuvassa 1.



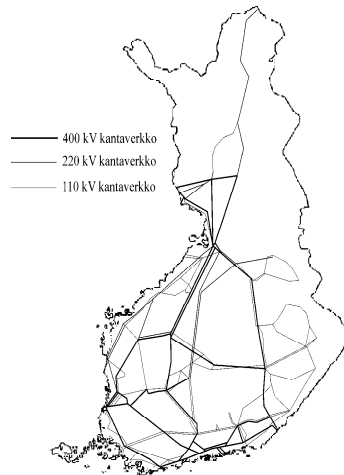
Kuva 1. Suomen sähköverkon periaatteellinen rakenne (Partanen 1997).

Tavoitteena on siirtää sähköenergia tuotantolaitokselta kulutuspisteeseen riittävän hyvälaatuisena niin halvalla kuin mahdollista. Optimaaliseen ratkaisuun pääsemiseksi siirtöjännitteet on porrastettu siten, että eri jännitetasoja käytetään siirrettäville erisuuruisille tehoille. Esimerkiksi yksittäisellä 400 kV:n johdolla voidaan siirtää yhden ydinvoimalayksikön teho. Vastaavan tehon siirtämiseen 110 kV:n jännitetasolla tarvitaan toistakymmentä yksittäistä johtoa. Ennen kulutuspistettä sähköverkot jalostavat tuotetun sähköenergian käyttäjälle sopivaan muotoon muuntamalla jännitettä kuvan 1 mukaisesti. (Elovaara & Laiho 2001, Partanen 1997)

3.1 Kantaverkko

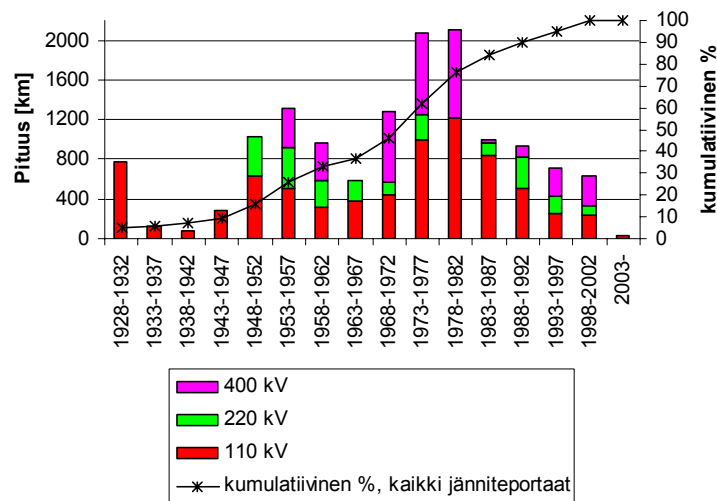
Kantaverkkoa käytetään sekä valtakunnan sisäisessä sähköenergian siirrossa että ulkomaille menevän ja ulkomailta tulevan sähkön siirrossa. Kantaverkko muodostuu 400

kV:n, 220 kV:n ja tärkeimmistä 110 kV:n siirtojohdoista sekä 400/220 kV:n, 400/110 kV:n ja 220/110 kV:n sähköasemista. Kantaverkkoon on kytketty kaikki merkittävät voimalaitokset. Suurin osa Suomessa kulutetusta sähköstä siirretään kantaverkon avulla. Kuvassa 2 on esitetty kantaverkko Suomen karttapohjalla.



Kuva 2. Suomen kantaverkko vuonna 2005 (Fingrid 2005a).

Kuvassa 3 on esitetty kantaverkon voimajohtojen rakennusmäärät viiden vuoden ajanjaksoittain sekä johtojen ikäjakauma.

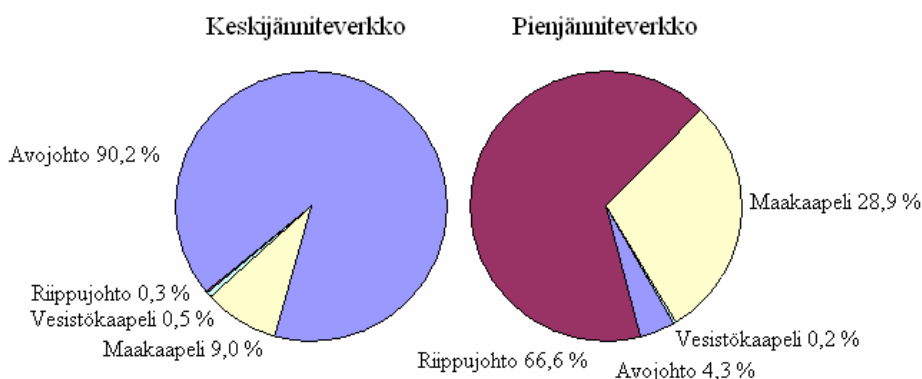


Kuva 3. Kantaverkon voimajohtojen rakennusmäärät viiden vuoden ajanjaksoittain ja ikäjakauma (Kuusinen 2005).

3.2 Jakeluverkko

Jakeluverkko muodostaa sähköverkon sen osan, jonka avulla jakeluverkkoyhtiöt siirtävät sähköä omista hankintapisteistään verkkoon liitetyille asiakkailleen. Alueverkkoa voidaan pitää osana jakeluverkkoa. Jakeluverkko muodostuu aluesiirto johdoista, sähköasemista, keskijänniteverkosta, jakelumuuntamoista ja pienjänniteverkosta.

Keskijänniteverkon kokonaispituus on noin 135 000 km ja pienjänniteverkon noin 220 000 km. Keskijännite- ja pienjänniteverkon johtojen jakautuminen kokonaisjohtopituudesta on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Keskijännite- ja pienjänniteverkon johtojen prosentuaalinen jakautuminen kokonaisjohtopituudesta (Adato 2003).

Maaseudulla keskijännitejohdot rakennetaan yleensä avojohtoina käyttäen puupylväitä ja teräsalumiinijohtimia. Puupylväille asennettavia riippukaapeli johtoja käytetään harvakseltaan. Riippukaapeli johtoja yleisempi tekniikka on rakentaa avojohto muovieristeellä päällystetyillä PAS-johtimilla, jolloin vaihejohtimet voidaan sijoittaa lähemmäs toisiaan ja tarvittava johtokadun leveys jää pienemmäksi. Lisäksi saavutettuja etuja ovat, etteivät johdinten keskinäiset kosketukset aiheuta keskeytyksiä eivätkä johdinvaurioita. Kustannuksiltaan päällystetty johto on ilmajohdon ja maakaapelin välissä. (Lakervi 1996)

Taajaan rakennetuilla alueilla keskijännitejohtoina käytetään yleensä maakaapeleita. Ympäristökäijät ja johtokatuongelmat ovat tärkeimpinä syinä käytäntöön. Maakaapeleiden käyttö lisää merkittävästi verkon rakentamiskustannuksia, mutta taajamissa kuormitustiheydet ovat niin suuria, että myytyä energiayksikköä kohti keskijänniteverkon kustannukset jäävät kaapeliverkoissakin hyväksyttävän alhaisiksi. (Lakervi 1996)

Pienjännitejohdoista eniten käytetty ratkaisu on AMKA-riippukierrekaapeli. Tiheään asutuissa taajamissa verkko on pääsääntöisesti maakaapelia, koska riippukierrehdoille ei ole tilaa tai niiden rakentamista ei ulkonäkösyistä sallita. Pienjännitejohdoissa avo-

johtojen osuus on erittäin pieni, ja avojohto onkin häviämässä kokonaan pois pienjänniteverkosta.

3.2.1 1000 Voltin järjestelmä

Jakeluverkkoja pyritään kehittämään jatkuvasti sähkön toimitusvarmuuden parantamiseksi. Ratkaisun tulee olla taloudellisen sekä verkonhaltijan että käyttäjän kannalta. 1000 Voltin järjestelmä on yksi ratkaisu jakeluverkkojen kehittämiseksi. Ensimmäiset kilovoltin pienjänniteverkon koekohteet otettiin käyttöön vuonna 2001.

1000 Voltin jakelujärjestelmässä lisätään kolmas jakelujänniteporras normaalien 20 kV:n ja 0,4 kV:n verkkojen väliin, jolloin vikaherkän 20 kV:n avojohtoverkon johtopi-tuus lyhenee ja varsinkin lyhyiden haarajohtojen määrä vähenee. Kilovoltin järjestelmässä voidaan käyttää johtimina normaaleja AMKA-riippukierrejohtoja, jolloin sähkön toimitusvarmuus paranee, koska AMKA-tyyppiset pienjänniteriippukaapelit kestävät oksien raapimiset sekä pienien puiden kaatumiset johdolle vikaantumatta.

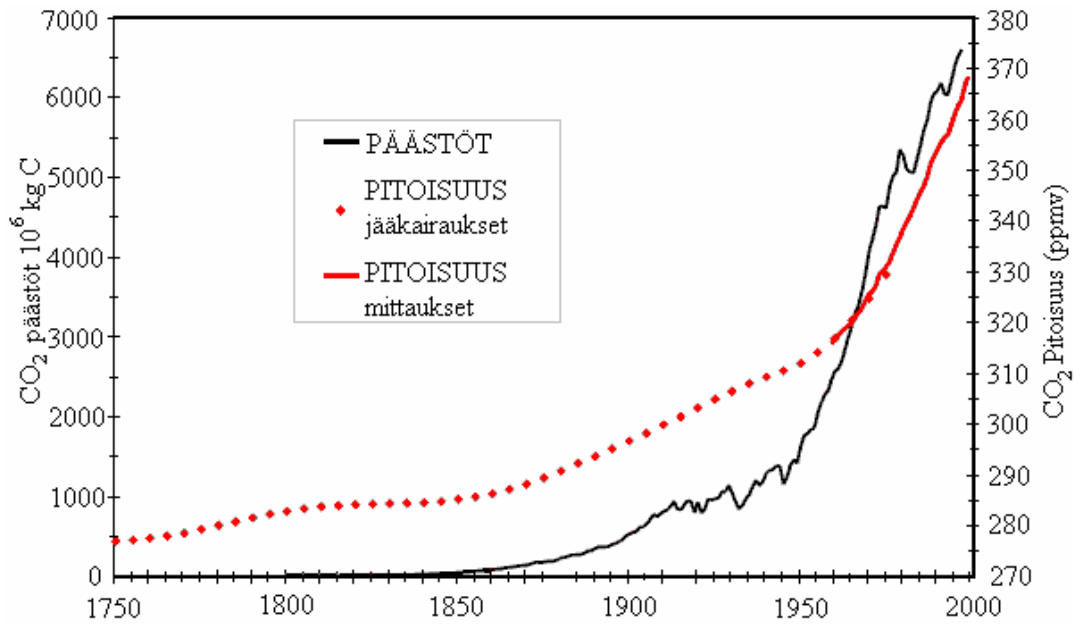
4. Ilmastonmuutos

4.1 Kuvaus ilmastonmuutoksesta

Ilmastolla tarkoitetaan tietyn alueen sään tyypillistä pitkäaikaista käyttäytymistä. Ilmasto kuvataan ilmastomuuttujien, kuten sadannan ja lämpötilan, keskiarvoilla ja muilla tunnusluvuilla. Nämä muuttujat eivät ole riippuvaisia ainoastaan ilmakehästä, vaan myös ilmakehän alla olevan pinnan ominaisuuksista. Siihen, millainen ilmasto jollakin paikalla on, vaikuttavat ilmastotekijät. Tärkeimpiä ilmastotekijöitä ovat maanpinnan säteilytase, maan ja vesistöjen jakaumat, vallitsevat meri ja ilman virtaukset, korkeus merenpinnasta ja maanpinnan muodot, kasvillisuus, maalaji sekä mahdollinen lumi- tai jääpeite. (Ilmatieteen laitos 2005a)

Maapallon ilmasto ei ole vakio, vaan se vaihtelee luonnostaan useilla alue- ja aikaskaaloilla. Mainittavia esimerkkejä ovat muun muassa geologisten aikajaksojen vaihtelut jääkausien ja lämpimämpien jaksojen välillä sekä muutamien vuosien välein tapahtuvat El Niño- ja La Nina -heilahdukset, joiden vaikutukset ulottuvat Tyyneltä valtamereltä sen ympäristöön ja koko tropiikkiin. (Savolainen et al. 2003)

Ihmisen toiminta on tullut uutena tekijänä ilmaston vaihteluja aiheuttavien tekijöiden joukkoon. Paikallisesti ihmiset ovat vaikuttaneet ilmastoon jo useiden satojen vuosien ajan ennen kaikkea maankäytön muutosten kautta, kuten esimerkiksi kuivattamalla kosteikkoja pelloiksi ja raivaamalla metsiä. Teollistumisen myötä alkoi ihmiskunta vaikuttaa globaalissa mittakaavassa ilmastoon muuttamalla ilmakehän koostumusta. Kuvassa 5 on esitetty fossiilisten polttoaineiden käytöstä ja sementin tuotannosta aiheutuvat vuosittaiset hiilidioksidipäästöt sekä ilmakehän hiilidioksidipitoisuus jääkairauksista ja mittauksista. (Savolainen et al. 2003)



Kuva 5. Fossiilisten polttoaineiden käytöstä ja sementin tuotannosta aiheutuvat vuosittaiset hiilidioksidipäästöt yksikkönä miljoonaa hiilitonnia sekä ilmakehän hiilidioksidipitoisuus jääkairauksista ja mittauksista yksikkönä tilavuuden miljoonasosa. Jääkairaukset on tehty Etelämantereella ja pitoisuusmittaukset ovat vuosikeskiarvoja Mauna Loa:ta Havaijilta. (Ilmatieteen laitos 2005a)

Maapallon säteilytase on muuttumassa nopeasti, mikä johtaa ilmastonmuutokseen. Säteilytaseen ollessa tasapainossa on lähtevän ja tulevan säteilyenergian määrä yhtä suuri. Kasvihuonekaasujen lisääntyminen ilmakehässä hidastaa energian siirtymistä avaruuteen, mutta kaasut eivät vaikuta auringosta maapallolle tulevan säteilyn määrään. Säteilytaseen epätasapainosta käytetään nimitystä säteilypakote. (Savolainen et al.2003)

Vuonna 1988 perustettu hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli, IPCC, on julkaissut perustamisensa jälkeen kolme arviointiraporttia. Näiden kolmen raportin valmisteluun on osallistunut tuhansia tutkijoita. Vuonna 1990 julkaistiin ensimmäinen raportti ja vuonna 1995 toinen. Uusimmassa, vuoden 2001 syyskuussa julkaistussa arviointiraportissa IPCC totesi, että "on olemassa uutta entistä vahvempaa näyttöä siitä, että suurin osa viimeksi kuluneen 50 vuoden aikana havaitusta ilmaston lämpenemisestä on ihmiskunnan aikaansaannosta". (Ilmatieteen laitos 2005a)

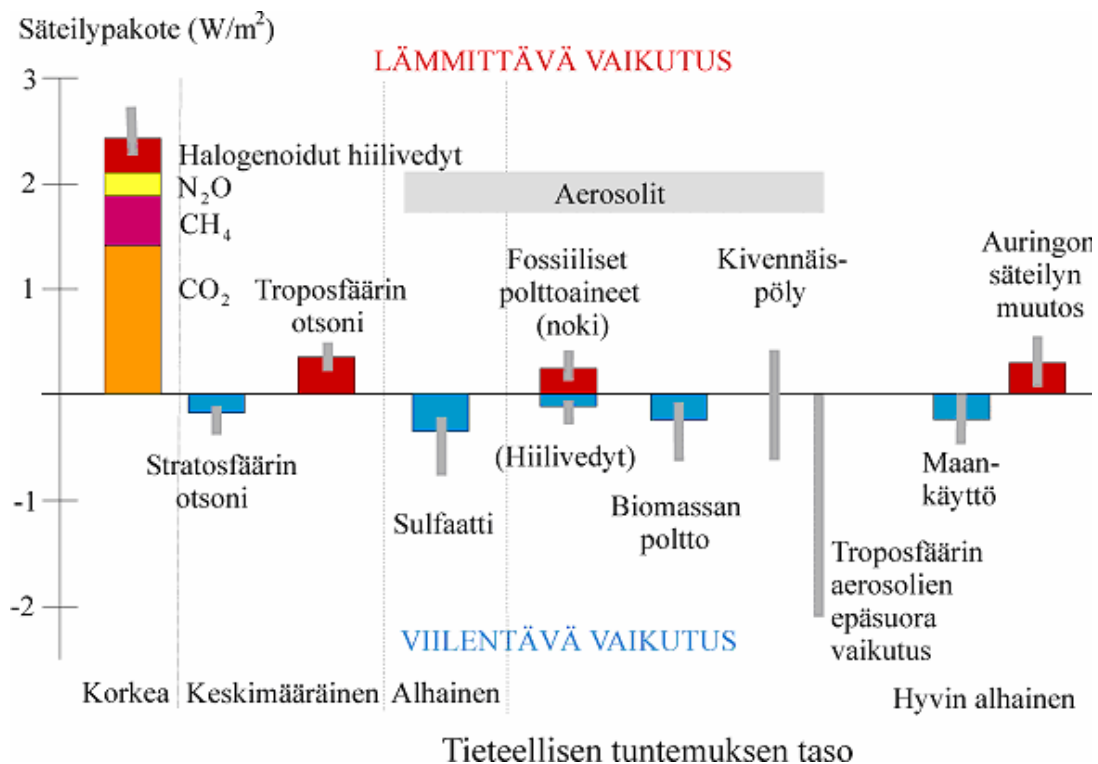
Ihmisen toiminnasta peräisin olevista kaasuisista maapallon säteilyenergiataseelta muuttavat eniten hiilidioksidi (CO_2), metaani (CH_4), dityppioksidi (N_2O), kloorifluoratut hiilivedyt (CFC), fluoriyhdisteet esimerkiksi rikkiheksafluoridi (SF_6) ja bromiyhdisteet. Pitkäikäisillä kasvihuonekaasuilla, kuten SF_6 :lla ja PFC:lla on pitkään kestävä vaikutus säteilypakotteeseen, ilmakehän koostumukseen ja ilmastoon. Esimerkiksi CO_2 -päästöjen jälkeen kestää satoja vuosia siihen, kun enää neljäsosa kyseessä olevien päästöjen lisäämästä CO_2 -pitoisuudesta on vielä ilmakehässä jäljellä. Taulukossa 1 on esitetty muu-

taman kasvihuonekaasun elinikä ilmakehässä sekä niiden suhteellinen vaarallisuus hiilidioksiidiin verrattuna. Eri kaasuja vertailtaessa yksikkönä käytetään lämmityspotentiaalia GWP, joka mittaa kaasun aiheuttamaa lämmitysvaikutusta hiilidioksiidiin verrattuna. (Savolainen 2003, Ilmatieteen laitos 2005a)

Taulukko 1. Muutaman kasvihuonekaasun elinikä ilmakehässä ja GWP-indeksi (IPCC 2001).

Kaasu	Elinikä (v)	GWP _{20 v}	GWP _{100 v}
hiilidioksidi (CO ₂)	50–200	1	1
metaani (CH ₄)	12	62	23
dityppioksidi (N ₂ O)	114	275	296
tetrafluorimetaani (CF ₄)	50 000	3900	5700
rikkiheksafluoridi (SF ₆)	3200	15 100	22 200

Kuvassa 6 on esitetty ihmisen toiminnasta aiheutuva maapallon keskimääräinen säteilypakote 1990-luvun lopulla verrattuna esiteolliseen aikaan eli noin 1750-lukuun.



Kuva 6. Ihmisen toiminnasta aiheutuva maapallon keskimääräinen säteilypakote 1990-luvun lopulta verrattuna esiteolliseen aikaan. Lisäksi kuvassa on esitetty luonnollinen säteilypakote, joka johtuu auringon säteilyn muutoksesta. Pystysuuntainen viiva kuvaa säteilypakotteen epävarmuusarvioita. Alareunassa on sanallinen käsitys kunkin arvion luotettavuudesta. (IPCC 2001)

Kuvasta 6 käy ilmi, että kasvihuonekaasujen lisäksi maapallon säteilytasapainoon vaikuttavat monet muut seikat. Näistä useimpia tunnetaan toistaiseksi melko epätarkasti. Ilmakehän otsonikato viilentää ilmastoa lievästi, ja lisäksi maapallon säteilytaseeseen vaikuttavat myös monet paikalliset tai alueelliset muutokset. Erityisesti rikkipäästöistä muodostuvat sulfaattihiukkaset sekä poltosta peräisin olevat useat muut hiukkaset viilentävät ilmastoa heijastamalla maapallolle tulevaa auringon valoa avaruuteen ja vähentämällä maapallolle imeytyvää säteilyenergiaa. Nokihiuukkaset ja alailmakehän otsonin lisääntyminen puolestaan lisäävät lämpövaikutusta ilmakehässä. Toisaalta hiukkaset vaikuttavat myös pilvisyyden lisääntymiseen. Tämän arvioidaan viilentävän ilmastoa melko paljon, mutta vaikutus tunnetaan huonosti. Myös metsien väheneminen viilentää ilmakehää, sillä auringon säteily heijastuu avomaalta takaisin avaruuteen paremmin kuin metsistä, mutta toisaalta metsien väheneminen vapauttaa hiilidioksidia ilmakehään. (Savolainen et al. 2003)

Ilmasto on järjestelmänä monimutkainen ja osa sen kytköksistä on epälineaarisia. Esimerkiksi lumipeite alkaa hävitä, kun lämpötila kohoaa yli nollan Celsius-asteen. Samalla pinnan kyky heijastaa auringon säteilyä pienenee merkittävästi, ja pinnalla käytettävissä oleva energia lisääntyy mahdollisesti kohottaen lämpötilaa. Ilmastojärjestelmän sisäiset kytkennät saattavat tasata tai voimistaa ulkoisia pakotteita. (Ilmatieteen laitos 2005a)

4.2 Ilmastonmuutoksen ennustaminen

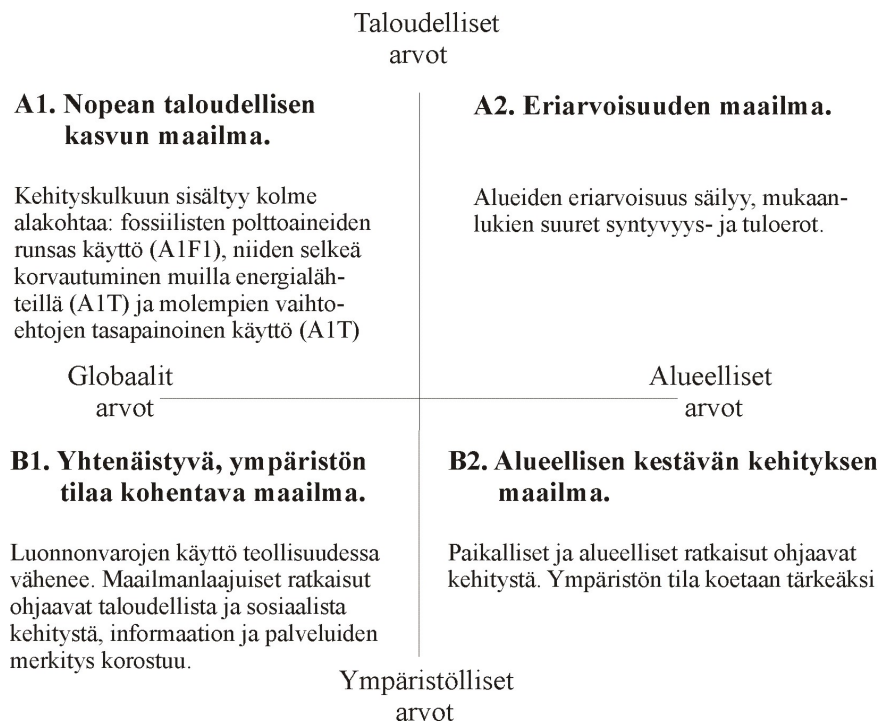
Ennustettaessa ilmastoa muutamasta kymmenestä sataan vuoteen eteenpäin tarvitaan tietoa ilmaston nykytilasta sekä siihen vaikuttavien pakotteiden muutoksista. Lisäksi tarvitaan ilmastomalli, joka tulkitsee, miten sille syötetyt pakotteet muokkaavat ilmastoa. Ilmastonmuutosta tutkittaessa on tarkasteluun syytä ottaa huomioon koko ilmastojärjestelmä. (Ilmatieteen laitos 2005a)

Auringon käyttäytymistä ei tunneta täysin, mutta nykyisen tietämyksen mukaan auringon säteilytoiminta jatkuu vakaana. Tarkastelusta voidaan jättää huomioimatta maapallon radan vaihteluista johtuvat muutokset auringon säteilyn määrässä ja alueellisessa jakaumassa eri vuodenaikoina. Myös tulivuoren purkaukset jätetään huomioimatta, koska suuremman yksittäisen purkauksen vaikutukset tuntuvat vain pari vuotta. (Ilmatieteen laitos 2005a)

Ilmiöiden aikaskaala on tärkeää mieltää ilmastoennusteiden tulkitsemisessa. Koska kysymyksessä on keskimääräisten olojen muutos, ei johtopäätöksiä voi tehdä yksittäisten sääilmiöiden tai edes muutaman vuoden poikkeavuuden perusteella, vaikka näin usein kuvitellaan.

Tulevan ilmaston ennustamiseen vaaditaan lähtötietoina ennuste kasvihuonekaasujen pitoisuuden muutoksista ilmakehässä. Eli tieto siitä, mikä on ihmisen aiheuttamien päästöjen määrä tulevaisuudessa. Ilmakehän koostumuksen skenaarioita voidaan laskea päästöskenaarioista. Ilmastoennusteita saadaan laadittua käyttämällä ilmakehän koostumuksen muutoksia kuvaavia skenaarioita pakotteina ilmastomalleissa. Ilmastomallin tehtäväksi jää määrittää millaiseksi ilmasto muuttuu. Malleista saadaan tuloksena erisuuruisia muutoksia ilmastossa erilaisilla päästöskenaarioilla. (Ala-Outinen et al. 2004)

Ilmastomallien ennusteet ovat selkeitä fysiikan peruslakeihin perustuvia laskentatuloksia. Sen sijaan päästöskenaariot, joihin ilmastomallien ennusteet perustuvat ovat enemmän tai vähemmän omakohtaisia ennusteita ihmisen globaalista käyttäytymisestä tulevaisuudessa. Kuvassa 7 on esitetty IPCC:n käyttämä päästöskenaarioiden luokittelu.



Kuva 7. IPCC:n mukainen päästöskenaarioiden luokittelu (Kuusisto & Käyhkö 2004).

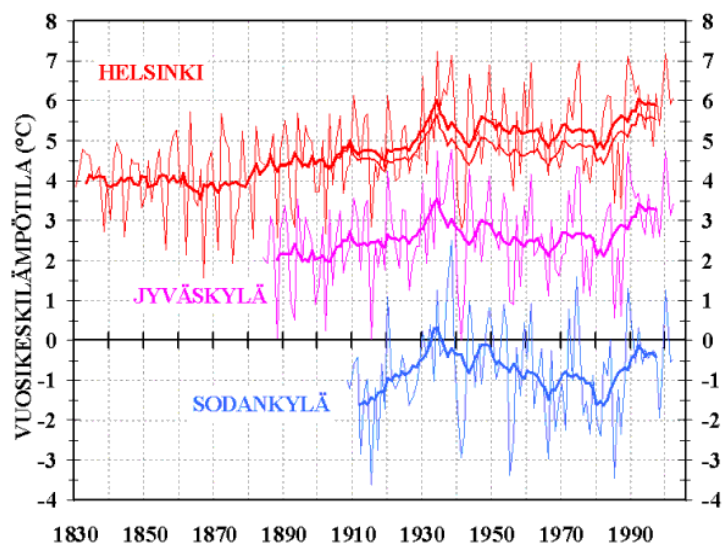
4.3 Havaitut muutokset Suomessa

Ilmatieteen laitoksen vuosina 1961–2000 tekemien mittausten perusteella selvitetiin, onko havaittavissa selviä muutoksia tietyissä ilmastomuuttujissa. Aineisto käytiin läpi vuosittaisen sademäärän, päivien lukumäärän jolloin tuulen nopeus ≥ 10 m/s, maan lämpötilan ja kasvukauden pituuden osalta. Havaintopaikkoina oli Helsinki-Vantaan lentoasema, Jyväskylä, Kuopio ja Sodankylä. Aineiston perusteella ei ilmennyt selvää muutosta kyseisissä säättekijöissä. Tämä ei kuitenkaan sulje pois ajatusta, ettei muutoksia olisi tapahtunut verrattuna pitempään ajanjaksoon.

Tuulten voimakkuuksien ja niiden esiintymismäärien määrittäminen ilmatieteen laitoksen havaintoaineiston perusteella ei kerro koko totuutta esiintyneistä tuulista. Kansainvälisesti myrskyn rajaksi on määritelty 21 m/s 10 minuutin keskituulen nopeutena. Tästä johtuen esimerkiksi voimakkaiden ukkospuuskien hetkelliset myrskylukemat jäävät tilastoimatta. Ukkospuuskat ovat aina lyhytkestoisia, muutamasta sekunnista noin minuuttiin, ja ne puhaltavat tyypillisesti 20–30 m/s nopeudella. Lyhytaikaisuudesta huolimatta puuskien tuhot voivat olla merkittäviä. (Ilmatieteen laitos 2005b)

Lämpötilan havaintomateriaali on muiden säätekijöiden havaintomateriaalia huomattavasti laajempi. Suomen keskilämpötilan muutokset tunnetaan melko tarkasti aina 1840-luvulta alkaen. Vuosikeskilämpötila on kohonnut tasaisena muutoksena tulkittuna reilun asteen 150 vuoden aikana. Kevätkuukausien osalta lämpeneminen on ollut voimakkaampaa, noin 2 astetta. Suomessa lämpötilan muutos on ollut samanlaista kuin muualkin maapallolla, eli keskilämpötila on selvästi kohonnut 1970-luvun puolivälistä nykypäivään. Ajanjaksoon osuu myös suuria vaihteluita, kylmät talvet 1985 ja 1987 sekä lämpimiä vuosia 1990-luvulla. (Ilmatieteen laitos 2005a)

Kuvassa 8 on esitetty vuosikeskilämpötilat Helsingin Kaisaniemessä vuosilta 1830–2002, Jyväskylässä 1884–2002 ja Sodankylässä 1908–2002.



Kuva 8. Vuosikeskilämpötilat Helsingin Kaisaniemessä vuosilta 1830–2002, Jyväskylässä 1884–2002 ja Sodankylässä 1908–2002. Ohut viiva esittää vuotuiset arvot ja paksu viiva esittää kymmenen vuoden liukuvan keskiarvon. Mukana on myös arvio siitä, miten paljon kaupungistuminen on kohottanut lämpötilaa Helsingissä. Arvio on esitetty keskipaksulla viivalla kymmenen vuoden liukuvana keskiarvona. (Ilmatieteen laitos 2005a)

4.4 Näkemyksiä ääri-ilmiöiden lisääntymisestä

Ilmastonmuutos on tällä hetkellä aiheena ajankohtainen. Eri tiedotusvälineistä saa aika ajoin kuulla tai lukea asiantuntijoiden lausuntoja ilmastonmuutoksesta yleisesti sekä ääri-ilmiöiden voimakkuuksista ja esiintymismääristä. Asiantuntijoiden lausunnot perustuvat joko omiin tutkimuksiin tai mielipiteisiin.

Viime vuosina ilmenneet voimakkaat sääilmiöt ovat saaneet varmasti monet miettimään, että joko kyseiset sääilmiöt ovat merkkeinä ääri-ilmiöiden määrien lisääntymisestä. Dosentti Esko Kuusisto Suomen ympäristökeskuksesta kuitenkin toteaa, että tietokonemallit ennustavat ääri-ilmiöiden voimistumista, mutta tähänastinen ilmastonmuutos on kuitenkin niin heikko, ettei viimeaikojen ääri-ilmiöitä voi laittaa sen piikkiin. (Tietoyhteys 2005)

Hämeen Sanomissa 25.2.2005 esitetyssä haastattelussa Ilmatieteen laitoksen tutkija Heikki Tuomenvirta sanoo "Tulevaisuudessa tyypillinen talvi voi olla jatkuvaa pakkasen ja loskan sahausta". "Todennäköisesti viime heinä–elokuun vaihteen kaltaiset erittäin rajut sateet tulevat lisääntymään. Ne voivat olla hyvinkin paikallisia, mutta totuttua suurempia ryöppyjä. Rankkasateet voivat aiheuttaa tulvia jokivarsiseutujen lisäksi myös muualla".

Seura-lehden numerossa 9/05 on haastateltu Ilmatieteen laitoksen varapääjohtajaa professori Mikko Alestaloa. Hänen näkemyksensä mukaan kuumat ja kuivat kesät yleistyvät, ja rankkasateita tulee nykyistä yleisemmin seuraavan kahdenkymmenen vuoden kuluessa.

Ilmatieteen laitoksen entisen pääjohtaja Erkki Jatilan mukaan "Yleisesti tiedetään, että kun ilmasto hakee uutta tasapainoa, voimakkaat sääilmiöt ovat silloin tyypillisiä". (Savolainen et al. 2003)

Helsingin yliopiston fysikaalisten tieteiden laitosten tutkija, Jouni Räisänen, totesi Fysiikan päivillä SMFL-seminaarissa 19.3.2005, ettei hämmästyttävän yleinen käsitys kaikkien mahdollisten ääri-ilmiöiden voimistumisesta ilmaston lämmitessä pidä paikkaansa.

Taloustutkimus on tehnyt tutkimuksen aiheesta "Kansalaisen käsitykset ilmastonmuutoksesta". Kyselyyn vastanneiden kansalaisten mukaan ilmastonmuutos lisää rankkasateita ja niistä aiheutuvia tulvia. Myös ilmaston lämpötila nousee ja myrskyt yleistyvät. (Energiauutiset 2005)

Kansalaisten vastauksista näkee selvästi, kuinka yhtenäiset mediassa esitetyt väittämät ilmastonmuutoksesta ovat. Jos mediassa esitettäisiin vastaväitteitä ääri-ilmiölle, niin tämä varmasti näkyisi myös kyselyn vastauksissa.

5. Ilmastomallit

5.1 Kuvaus ilmastomalleista

Ilmastomallissa pyritään kuvaamaan kaikki ilmakehän keskimääräiseen käyttäytymiseen vaikuttavat tekijät. Näiden tekijöiden kuvaamiseen käytetään neljää eri komponenttia; ilmakehä, meri, lumi ja jäätikkö. Malleissa on myös mukana tärkeimmät ilmakehän kaasujen määrään vaikuttavat prosessit, kuten kasvillisuuden vaikutus ja hiilidioksidin varastoituminen meriin. Ilmastomalli on varsin monimutkainen ilmakehän fysiikkaa kuvaava numeerinen malli, joka on kirjoitettu tietokoneella tapahtuvaan laskentaan soveltuvaan muotoon. Tässä vaiheessa joudutaan kuitenkin tekemään huomattavia yksinkertaistuksia, jolloin paraskin ilmastomalli on vajavainen kuvaus luonnosta. (Ilmatieteen laitos 200b, Ala-Outinen et al. 2004)

Ilmastomallien pyörittämiseen käytetään maailman tehokkaimpia tietokoneita. Malleissa simuloidaan ilmakehän toimintaa niin pitkälle, että tuloksista saadaan selville keskimääräiset olosuhteet, eli siis ilmasto.

Mallien toimintaa ilmaston ennustamisessa on todennettu syöttämällä niihin jo tapahtuneet ilmastoon vaikuttaneet muutokset, kuten muun muassa mitatut kasvihuonekaasujen lisäykset ilmakehässä, ja vertaamalla näin saatua lämpötilakäyrää maailmanlaajuiseen säähavaintoverkoston perustuvaan lämpötilakäyrään. Onkin todettu, että ilmastomallit pystyvät melko realistisesti simuloimaan nykyilmaston. Malleilla kyetään myös kuvaamaan monet menneiden aikojen, kuten esimerkiksi viime jääkauden ilmastojen pääpiirteet. (Ala-Outinen et al. 2004)

Ilmastomallissa laskenta toteutetaan normaalisti 3-ulotteisessa hilapisteikössä, jonka yhden hilapisteen sivun pituus vaihtelee alueellisen ilmastomallin muutamasta kymmenestä kilometristä globaalin mallin satoihin kilometreihin. Jokaisen hilapisteen suureet, kuten esimerkiksi lämpötilan, paineen ja virtauksen nopeuden hetkelliset muutosnopeudet lasketaan yhtälöistä numeerisesti aika-askel kerrallaan. Aika-askeleen pituus vaihtelee ilmastomallista riippuen noin kymmenestä minuutista vajaaseen tuntiin. Jokaisella aika-askeleella saadaan uudet muutosnopeudet. Tyypillinen simulointiaika on noin 100 vuotta eli vuoteen 2100 saakka. (Tietoyhteys 2005, Räisänen 2005a)

Tietokonemallit eivät voi mitenkään erottaa kaikkia luonnossa vaikuttavia ilmiöitä. Tällaiset ilmiöt joudutaan kuvaamaan epäsuorasti mallin muuttujien avulla, eli parametrisoinnilla. Parametrisointia vaativia prosesseja ovat muun muassa pilvien ja sateen muodostuminen. Mallissa erottumattomien ilmiöiden vaikutus mallissa mukana oleviin ilmiöihin on arvioitava mukava olevien ilmiöiden perusteella. Parametrisoinnit ovat

enemmän tai vähemmän epätarkkoja ja tämä onkin suurin syy eri ilmastomallien tulosten eroihin. (Räisänen 2005)

Globaalisen ilmastomallin erottelutarkkuus ei ole riittävä alueellisen ja paikallisen mitataavan tarkasteluun. Tästä johtuen on kehitetty tekniikoita parempien tuloksien saamiseksi tietyiltä alueilta kuten esimerkiksi Skandinaviasta. Yksi tällainen menettelytapa on käyttää alueellista ilmastomallia yhdessä globaalimallin kanssa. Globaaliammastomallia tarvitaan kuvaamaan alueellisen mallin rajojen ulkopuolella vallitsevat olosuhteet, ja varsinaisen alueen ilmastomuuttumisen tutkiminen tapahtuu alueellisella ilmastomallilla. (Achberger et al. 2003)

Mallien biosfäärin kuvaukset ovat erittäin karkeita. Eri tutkimuslaitosten ilmastomallit poikkeavat toisistaan ja kuvaavat esimerkiksi ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kaksinkertaistumisesta seuraavan ilmastomuutoksen yksityiskohdiltaan poikkeavasti. Maapallon keskilämpötilan nousu on kuitenkin kaikissa ilmastomalleissa yhteinen piirre. (Ilmatieteen laitos 2005a)

5.2 Ennusteiden laadinnassa käytetyt ilmastomallit

Ilmastomuutosennusteet on laadittu RCAO-ilmastomallin antamien laskelmien perusteella. RCAO-ilmastomalli koostuu kahdesta pääkomponentista, RCA-ilmakehämallista ja RCO-Itämerimallista. RCAO-mallin alue koostuu $106 \times 102 = 10812$:sta 49×49 km²:n vaakataso hilaruudusta, kattaen suurimman osan Eurooppaa.

Ilmatieteen laitos toimitti tuuli- ja maanlämpödatan ja VTT:n Prosessit ja Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka -yksiköt toimittivat jäätyms- ja kosteusdatan. Datat on tuotettu käyttäen ilmastomallin ilmakehäkomponenttia RCA2. Keskilämpötilan ja keskimääräisen sadannan muutosennusteet on saatu lähteestä Räisänen 2004. Ääriämpötilojen ja -sademäärien muutokset on saatu lähteestä Ruokolainen 2005.

Kaikissa tapauksissa RCAO-mallien rajojen olot on määritelty kahdella globaalilla ilmastomallilla, HadAM3-H:lla ja ECHAM4-OPYC3:lla. Päästöskenaarioina on käytetty A2- ja B2-päästöskenaariota. Päästöskenaariossa A2 kasvihuonekaasut CO₂, CH₄ ja N₂O ovat suuremmat kuin B2:ssa.

5.3 Ilmastomallien epävarmuustarkastelu

Ilmastomallit ovat erittäin monimutkaisia, jolloin normaalia epävarmuustarkastelua on lähes mahdoton tehdä. Esimerkiksi mallien kyvystä simuloida nykyistä ilmastoaa voi

tehdä parhaimmillaankin ainoastaan subjektiivisia johtopäätöksiä. Epävarmuusarviot täytyy perustaa lähinnä siihen, kuinka paljon eri mallikokeiden tulokset eroavat toisistaan. (Räisänen 2005b)

Ilmastonmuutoksen suuruutta kuvataan usein globaalin keskilämpötilan muutoksella. IPCC:n laskelmien perusteella maapallo lämpenee vuodesta 1975 vuoteen 2085 mennessä noin 1,5–5 °C. Tulosten epävarmuus aiheutuu puoliksi päästöskenaarioista ja puoliksi mallien välisistä eroista. RCAO-simulaatioiden reunaehdot tuottaneissa ECHAM4 ja HadAM3-H globaaleissa malleissa globaali lämpeneminen jaksosta 1961–1990 jakssoon 2071–2100 vaihtelee välillä 2,3–3,4 °C. Tässä suhteessa simulaatiot osuvat aika hyvin epävarmuushaarukan keskellä, mutta eivät kuitenkaan kata sitä läheskään kokonaan. (Räisänen 2005b)

Edellä esitetty pätee myös lämpötilan muutoksille Euroopan alueella. Esimerkiksi Räisänen (2001: Terra, 13:3, 139–151) vertaili 19 eri ilmastomallin tuloksia Skandinavian ja Tanskan alueilla. Vuosikeskilämpötilan muutos näissä kokeissa vaihteli 70 vuoden aikana välillä 0,2–6,4 °C, ja kahta poikkeusta lukuun ottamatta arvot olivat välillä 1,1–4,0 °C. Absoluuttisia arvoja ei voi verrata ECHAM4- ja HadAM3-H-simulaatioihin, koska aikaskaala on lyhyempi. Suhteellinen hajonta antaa kuitenkin kuvan tilanteesta. Simulaatiot osuvat kohtuullisen hyvin epävarmuushaarukan keskelle. (Räisänen 2005b)

Sademäärien muutosten osalta ECHAM4- ja HadAM3-H-simulaatiot ovat pääpiirteiden osalta tavanomaisia, enemmän sadetta Pohjois-Euroopassa talvella ja vähemmän Keski- ja Etelä-Euroopassa kesällä. Länsi-Norjassa sademäärän muutokset ovat ECHAM4- ja HadAM3-H-simulaatioissa varsin erilaisia, etenkin talvella. Samansuuntainen, mutta pienempi ero näkyy myös muualla Pohjoismaissa. Tämä liittyy ilmakehän kiertoliikkeen muutoksiin. ECHAM4:ssä länsituulet voimistuvat ja sykloniradat siirtyvät pohjoiseen, mutta näin ei tapahdu HadAM3-H:ssa. Kyseisen kiertoliikkeen muutosten osalta ECHAM4 ja HadAM3-H edustavat olemassa olevan mallivalikoiman eri ääripäitä. Useimmissa malleissa länsituulet voimistuvat hiukan, mutta kuitenkin vähemmän kuin ECHAM4:ssä. (Räisänen 2005b)

Se, kumpaan malliin pitäisi luottaa enemmän, on erittäin vaikea sanoa. Monia nykyilmaston piirteitä HadAM3-H simuloi hiukan paremmin kuin ECHAM4, mutta vertailu ei ole reilu, koska HadAM3-H vuosien 1961–1990 simulaatiossa käytettiin hyväksi havaittuja merenpinnan lämpötiloja. Toisaalta länsituulten voimistuminen osuu yhteen viime vuosikymmeninä havaittujen muutosten kanssa, mutta vielä ei tiedetä, kuinka iso osa havaitusta on ollut luonnollista satunnaisvaihtelua ja kuinka iso osa on mahdollisesti kasvihuonekaasujen lisääntymisen aiheuttamaa. On myös otettava huomioon, että mairittu trendi on tasaantunut 1990-luvun puolivälin jälkeen. (Räisänen 2005b)

Erilaiset tuulenopeuden muutokset RCAO-simulaatioissa liittyvät pääosin erilaisiin muutoksiin ilmakehän kiertoliikkeessä. Haarukka HadAM3-H-simulaatioista ECHAM4-simulaatioihin kattanee kohtalaisen ison osan, muttei varmastikaan kaikkea todellisesta epävarmuudesta. (Räisänen 2005b)

6. Muutosennusteet

Ilmastomallien antamien ennusteiden perusteella on määritetty ilmastomuuttujien muutosenusteet vuosille 2016–2045. Ennustukset perustuvat neljän eri simulaation tuloksiin. Tuloksista on esitetty ennusteet pienimmälle muutokselle ja suurimmalle muutokselle. Vertailujaksona on käytetty ilmastomallien antamia laskelmia vuosille 1961–1990.

Ilmastomalleilla on laskettu, päästöskenaarioita hyväksi käyttäen, ilmasto-olosuhteiden muutos vertailukaudelta ajanjaksolle 2071–2100. Laskelmista on saatu vuosien 2016–2045 ilmasto-olosuhteet arvioimalla muutoksen olevan 50 % vuosien 2071–2100 välille lasketusta muutoksesta. Tästä eteenpäin mainittaessa, että ennusteen on antanut HadAM3-H tai ECHAM4-OPYC3 tarkoitetaan tällä sitä ilmastomallia, jolla on määritetty RCAO-mallin rajaolosuhteet.

Ilmastoennusteita tarkasteltaessa on ymmärrettävä ennusteisiin liittyvä suuri epävarmuus. Seuraavassa on esitetty eri ilmastomuuttujien muutosenusteet, ja vaikka ne on esitetty suhteellisen tarkasti, niin muutoksia on syytä tarkastella ainoastaan muutoksen etumerkin mukaan. Varovaisia arvioita voi myös tehdä muutosten suuruudesta talven ja kesän välillä. Eli kasvaako vai väheneekö kyseisen ilmastomuuttujan vaikutus, ja onko muutos suurempi talvella vai kesällä. Ukkosmäärien muutosenuste on ainoastaan suuntaa antava arvio.

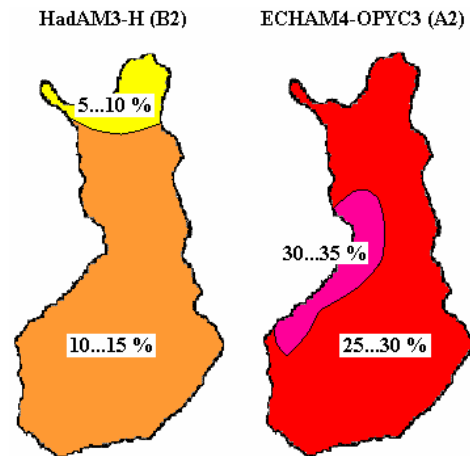
On myös ymmärrettävä, että seuraavat ennusteet koskevat 30 vuoden aikajaksoa, jolloin keskiarvoista puhuttaessa voivat vuosittaiset poikkeamat olla hyvinkin suuria. Huomatavaa on myös se, etteivät ennusteet kuvaa minkään yksittäisen vuoden ilmastotekijöitä vaan Suomen ilmastoa ajanjaksolla 2016–2045.

6.1 Sadanta

Sadannalla tarkoitetaan maahan sataneen veden määrää pinta-alaa ja aikaa kohden. Ilmastomallien mukaan sadanta lisääntyy sekä kesällä että talvella niin keskiarvoilla kuin maksimimäärillä mitattuina. Keskimääräisen sadannan kasvu on talven osalta huomattavasti suurempi kuin kesällä. Maksimimäärillä mitattuna lumisademaksimi kasvaa enemmän kuin vesisademaksimi. Vertailukaudella kesän keskimääräiset sademäärät olivat huomattavasti talven sademääriä suuremmat.

Talvikuukausien (joulu-, tammi- ja helmikuu) pienimmän keskimääräisen sadannan muutosenusteiden antoi HadAM3-H päästöskenaariolla B2. Vastaavasti suurimman keskimääräisen sadannan kasvun talvikuukausille ennusti ECHAM4-OPYC3 päästöskenaariolla A2. Kesäkuukausien (kesä-, heinä- ja elokuu) pienimmän ja suurimman keskimää-

räisen sadannan muutoksen antoi HadAM3-H. Pienin muutos tuli päästöskenaariolla A2 ja suurin muutos päästöskenaariolla B2. Keskimääräisen sadannan pienin ja suurin keskimääräinen muutosennuste on esitetty talvikuukausille kuvassa 9 ja kesäkuukausille kuvassa 10.



Kuva 9. Ilmastomallien antamat ennustukset ajanjakson 2016–2045 talven keskimääräiselle sadannan muutokselle verrattuna vertailujaksoon. Vasen kuva esittää pienintä ennustettua muutosta, ja oikea kuva esittää suurinta ennustettua muutosta. (Räisänen et al. 2004)

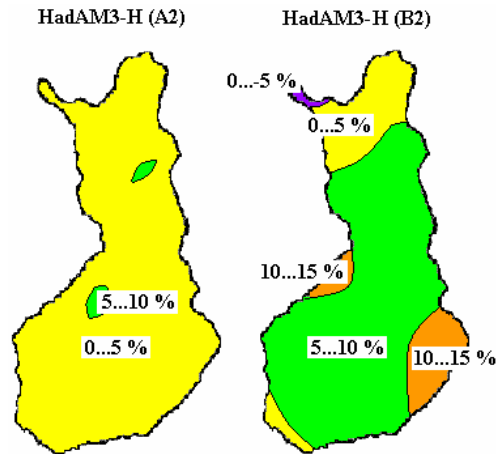
Pienimmän muutoksen antaneen ennusteen mukaan keskimääräinen sadanta lisääntyy talvella Pohjois-Lapissa 5–10 % ja muualla Suomessa 10–15 %. Suurimman muutoksen antaneen ennusteen mukaan keskimääräinen sadanta lisääntyy Pohjanlahden ympäristössä 30–35 % ja muualla Suomessa 25–30 %. Prosentuaalisessa muutoksessa on huomioitava, että sama prosentuaalinen muutos tietyssä ilmastomuuttujassa eri puolella Suomea ei tarkoita samaa määrällistä muutosta.

Taulukossa 2 on esitetty talvikuukausien sademäärien keskiarvot millimetreinä ajanjaksoille 1961–1990 ja 2016–2045. Keskiarvo ajanjaksolle 2016–2045 perustuu ennustettuun suurimpaan muutokseen.

Taulukko 2. Sademäärien keskiarvot ajanjaksojen 1961–1990 ja 2016–2045 talvikuukausille millimetreinä (Ilmatieteen laitos 1991).

	Keskiarvo 1961–1990 [mm/kk]			Keskiarvo 2016–2045 [mm/kk]		
	joulu	tammi	helmi	joulu	tammi	hel-
Helsinki	57,6	41,4	31,0	74,9	53,8	40,3
Tampere	38,8	33,1	23,1	50,4	43,0	30,0
Vaasa	39,0	30,2	21,5	52,7	40,8	29,0
Kuopio	37,6	34,7	25,4	48,9	45,1	33,0
Kuusamo	36,6	33,8	27,0	47,6	43,9	35,1
Sodankylä	30,8	30,7	25,5	40,0	39,9	33,2

Taulukossa 2 esitetyistä paikkakunnista on Helsingissä satanut eniten. Helsingissä joulukuun keskimääräinen sademäärä vertailukaudella 1961–1990 oli suurempi kuin muille paikkakunnille ennustettu suurin keskimääräinen sademäärä.



Kuva 10. Ilmastomallien antamat ennustukset ajanjakson 2016–2045 kesän keskimääräiselle sadannan muutokselle verrattuna vertailujaksoon. Vasen kuva esittää pienintä ennustettua muutosta, ja oikea kuva esittää suurinta ennustettua muutosta. (Räisänen et al. 2004)

Pienimmän muutoksen antaneen ennusteen mukaan keskimääräinen sadanta lisääntyy kesällä 0–5 %. Suurimman muutoksen antaneen ennusteen mukaan sadanta vähenee käsivarressa 0–5 % ja kasvaa Pohjois-Karjalassa ja osissa Pohjanmaata 10–15 %, Lapissa ja Lounais-Suomessa 0–5 % ja muualla Suomessa 5–10 %.

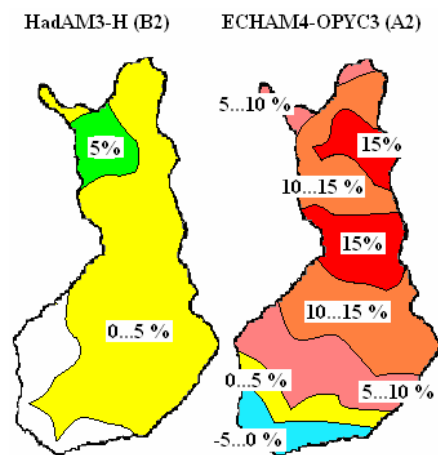
Taulukossa 3 on esitetty kesäkuukausien sademäärien keskiarvot millimetreinä ajanjaksoille 1961–1990 ja 2016–2045. Keskiarvo ajanjaksolle 2016–2045 perustuu ennustettuun suurimpaan muutokseen.

Taulukko 3. Sademäärien keskiarvot millimetreinä ajanjaksojen 1961–1990 ja 2016–2045 kesäkuukausille (Ilmatieteen laitos 1991).

	Keskiarvo 1961–1990 [mm/kk]			Keskiarvo 2016–2045 [mm/kk]		
	kesä	heinä	elo	kesä	heinä	elo
Helsinki	44,0	72,7	79,5	48,4	80,0	87,5
Tampere	49,7	69,1	74,0	54,7	76,0	81,4
Vaasa	37,6	58,0	67,9	41,4	63,8	74,7
Kuopio	55,6	65,9	78,7	61,2	72,5	86,6
Kuusamo	60,6	73,2	74,5	66,7	80,5	82,0
Sodankylä	55,9	64,7	62,8	61,2	71,2	69,1

Taulukossa 3 esitetyillä paikkakunnilla on, Sodankylää lukuun ottamatta, vuoden sateisin kuukausi elokuu. Sodankylässä on satanut eniten heinäkuussa. Helsingissä on satanut eniten ja sinne on ennustettu suurin määrällinen muutos. Suurin muutos jää kuitenkin määrällisesti varsin pieneksi.

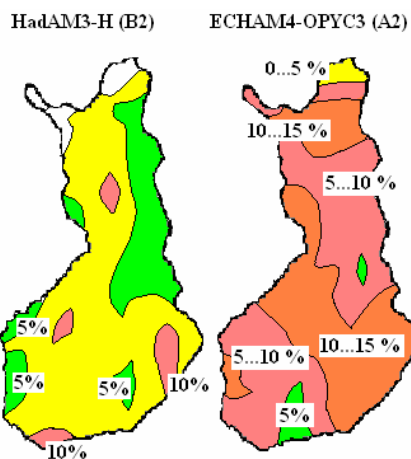
Kuvassa 11 on esitetty kuuden tunnin maksimilumisademäärien muutokset. ECHAM4-OPYC3 antoi päästöskenaariolla A2 suurimmat ja HadAM3-H antoi päästöskenaariolla B2 pienimmät maksimilumisademäärien muutosennusteet.



Kuva 11. Ilmastomallien antamat ennustukset ajanjakson 2016–2045 kuuden tunnin maksimilumisademäärien muutoksille verrattuna vertailujaksoon. Vasen kuva esittää pienintä ennustettua muutosta, ja oikea kuva esittää suurinta ennustettua muutosta.

Pienimmän muutoksen antaneen ennusteen mukaan maksimilumisademäärien kasvu vaihtelee välillä 0–5 %. Suurimman muutoksen antaneen ennusteen mukaan maksimilumisademäärät vähenevät Etelä-Suomessa enimmillään 5 % ja kasvavat muualla Suomessa. Kasvu on ennusteen mukaan suurinta Oulun läänissä ja Keski-Lapissa.

Kuvassa 12 on esitetty kuuden tunnin maksimivesisademäärien muutokset. ECHAM4-OPYC3 antoi päästöskenaariolla A2 suurimman ja HadAM3-H antoi päästöskenaariolla B2 pienimmän maksimivesisademäärien muutosennusteen.



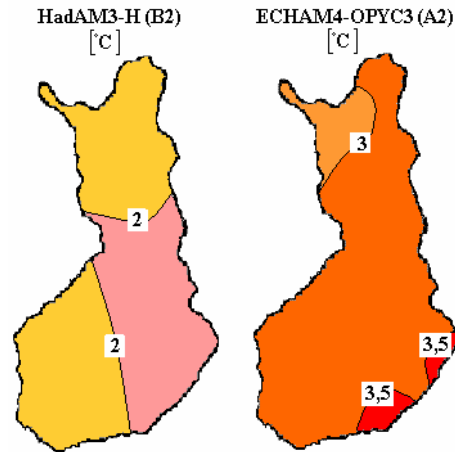
Kuva 12. Ilmastomallien antamat ennusteet ajanjakson 2016–2045 kuuden tunnin maksimiviesisademäärien muutoksille verrattuna vertailujaksoon. Vasen kuva esittää pienintä ennustettua muutosta, ja oikea kuva esittää suurinta ennustettua muutosta.

Pienimmän muutoksen antaneen ennusteen mukaan maksimiviesisademäärien kasvu vaihtelee pääasiassa 0–5 %. Paikallisesti esiintyy myös 10 % kasvua. Suurimman muutoksen antaneen ennusteen mukaan maksimiviesisademäärät kasvavat 5–15 % Utsjoen kunnan aluetta lukuun ottamatta. Utsjoella kasvu on 0–5 %.

6.2 Lämpötila

Keskilämpötilat ja ääriämpötilat on määritetty kahden metrin korkeudelle maan pinnasta Celsius-asteina. Lisäksi on esitetty mallien antamat ennustukset nollarajan ylitysten/alitusten lukumäärien muutoksille. Kaikilla simulaatioilla tuli samansuuntaiset ennusteet lämpötilojen muutoksille. Ennusteiden mukaan keskilämpötila kohoaa sekä kesällä että talvella. Talven osalta keskilämpötilojen muutos tulee olemaan suurempi kuin kesällä. Minimilämpötilojen ääriarvot muuttuvat huomattavasti enemmän kuin maksimilämpötilojen ääriarvot.

HadAM3-H antoi päästöskenaariolla B2 pienimmän ja ECHAM4-OPYC3 antoi päästöskenaariolla A2 suurimman keskilämpötilan muutosennusteen sekä talvi- että kesäkuukausille. Pienin ja suurin keskilämpötilojen muutosennuste on esitetty Celsius-asteina talvikuukausille kuvassa 13 ja kesäkuukausille kuvassa 14.



Kuva 13. Ilmastomallien antamat ennustukset vuosien 2016–2045 talven keskilämpötilan muutokselle verrattuna vertailujaksoon. Vasen kuva esittää pienintä ennustettua muutosta, ja oikea kuva esittää suurinta ennustettua muutosta.

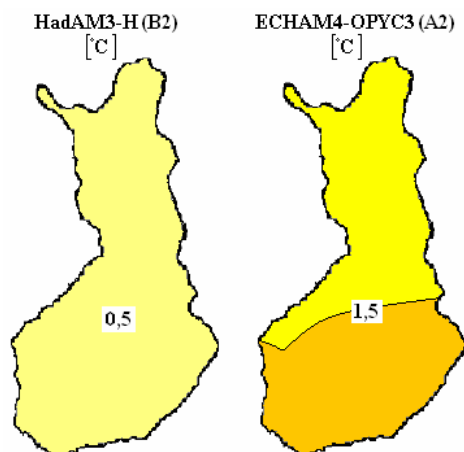
Pienimmän muutoksen antaneen ennusteen mukaan talvikuukausien keskilämpötila nousee Itä-Suomen ja Oulun läänin alueella yli kaksi astetta ja muualla Suomessa vajaa kaksi astetta. Suurimman muutoksen antaneen ennusteen mukaan talvikuukausien keskilämpötila nousee Enontekiön, Muonion ja osassa Kittilän ja Inarin aluetta vajaa kolme, Kaakkois-Suomessa yli 3,5 ja muualla Suomessa 3–3,5 astetta.

Taulukossa 4 on esitetty keskilämpötilat talvikuukausille Celsius-asteina ajanjaksoille 1961–1990 ja 2016–2045. Keskiarvo ajanjaksolle 2016–2045 perustuu suurimpaan ennustettuun muutokseen.

Taulukko 4. Keskilämpötilat talvikuukausille Celsius-asteina ajanjaksoille 1961–1990 ja 2016–2045 (Ilmatieteen laitos 1991).

	Keskilämpötila 1961–1990 [°C]			Keskilämpötila 2016–2045 [°C]		
	joulu	tammi	helmi	joulu	tammi	helmi
Helsinki	-4,1	-6,9	-6,8	-0,7	-3,5	-3,4
Tampere	-5,3	-8,0	-7,9	-2,0	-4,7	-4,6
Vaasa	-5,5	-7,8	-7,8	-2,3	-4,6	-4,6
Kuopio	-7,8	-11,0	-10,3	-4,5	-7,7	-7,0
Kuusamo	-11,5	-14,2	-12,9	-8,4	-11,1	-9,8
Sodankylä	-13,1	-15,1	-13,6	-10,1	-12,1	-10,6

Taulukossa 4 esitetyistä paikoista ovat Helsingin talven keskilämpötilat korkeimmat ja Sodankylän matalimmat. Suurimman keskilämpötilan muutoksen antaneen ennusteen mukaan Pohjois-Suomen talvilämpötilat lähestyvät Keski-Suomen vertailujakson lämpötiloja ja vastaavasti Keski-Suomen lämpötilat lähestyvät Etelä-Suomen vertailujakson lämpötiloja.



Kuva 14. Ilmastomallien antamat ennustukset vuosien 2016–2045 kesän keskilämpötilan muutokselle verrattuna vertailujaksoon. Vasen kuva esittää pienintä ennustettua muutosta, ja oikea kuva esittää suurinta ennustettua muutosta.

Pienimmän ennustetun muutoksen mukaan kesäkuukausien keskilämpötila kohoaa noin puoli astetta koko Suomessa. Suurimman ennustetun muutoksen mukaan kesäkuukausien keskilämpötila nousee yli 1,5 astetta eteläisen Suomen alueella ja vajaan 1,5 astetta muualla Suomessa.

Taulukossa 5 on esitetty kesäkuukausien keskilämpötilat Celsius-asteina vertailujaksolle 1961–1990 sekä ajanjaksolle 2016–2045. Ajanjakson 2016–2045 keskilämpötilat perustuvat suurimpaan ennustettuun muutokseen.

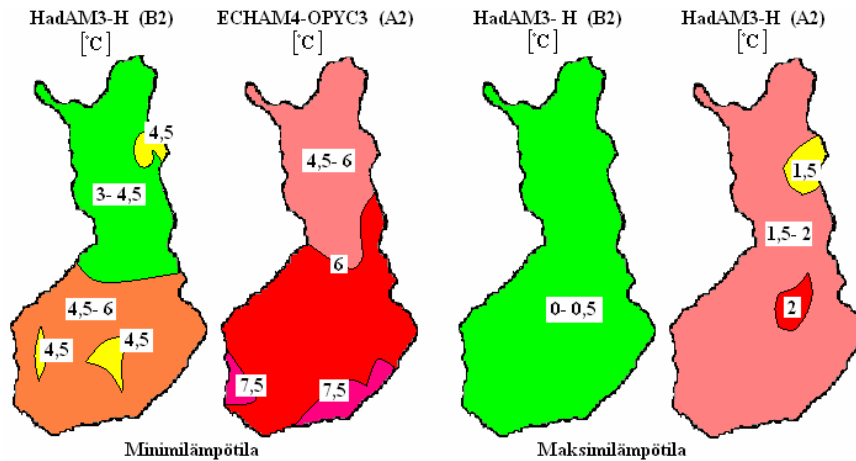
Taulukko 5. Keskilämpötilat kesäkuukausille Celsius-asteina ajanjaksoille 1961–1990 ja 2016–2045 (Ilmatieteen laitos 1991).

	Keskilämpötila 1961–1990 [°C]			Keskilämpötila 2016–2045 [°C]		
	kesä	heinä	elo	kesä	heinä	elo
Helsinki	14,9	16,6	15,0	16,6	18,3	16,7
Tampere	14,6	16,3	14,5	16,2	17,9	16,1
Vaasa	13,7	15,7	13,9	15,2	17,2	15,4
Kuopio	14,6	16,8	14,5	16,1	18,3	16,0
Kuusamo	11,7	14,2	11,4	13,1	15,6	12,8
Sodankylä	11,6	14,1	11,2	12,9	15,4	12,5

Taulukossa 5 esitetyistä paikoista on Kuopiossa mitattu kesäkuukausien korkein ja Sodankylässä matalin keskilämpötila. Ennustettu suurin keskilämpötila 18,3 °C vastaa Pohjois-Saksan nykyistä heinäkuun keskilämpötilan arvoa.

Kuvassa 15 on esitetty minimi- ja maksimilämpötilojen ääriarvojen muutokset. HadAM3-H antoi päästöskenaariolla B2 pienimmät muutokset minimi- ja maksimilämpö-

tilalle sekä päästöskenaariolla A2 suurimman muutoksen maksimilämpötilalle. ECHAM4-OPYC3 antoi päästöskenaariolla A2 suurimman minimilämpötilan muutosennusteen.



Kuva 15. Ilmastomallien antamat ennustukset vuosien 2016–2045 lämpötilojen ääriarvojen muutoksille verrattuna vertailujaksoon. Vasemmalla minimilämpötilojen pienin ja suurin ennustettu muutos sekä oikealla maksimilämpötilojen pienin ja suurin ennustettu muutos. (Ruokolainen 2005)

Suomessa vuosittaiset minimilämpötilat koetaan normaalisti tammi- tai helmikuussa. Minimilämpötilat nousevat pienimmän muutoksen antaneen ennusteen mukaan 3–6 astetta ja suurimman muutoksen antaneen ennusteen mukaan 4,5–7,5 astetta. Maksimilämpötilat koetaan normaalisti heinäkuussa. Maksimilämpötilat nousevat pienimmän muutoksen antaneen ennusteen mukaan 0–0,5 astetta ja suurimman muutoksen antaneen ennusteen mukaan 1,5–2 astetta.

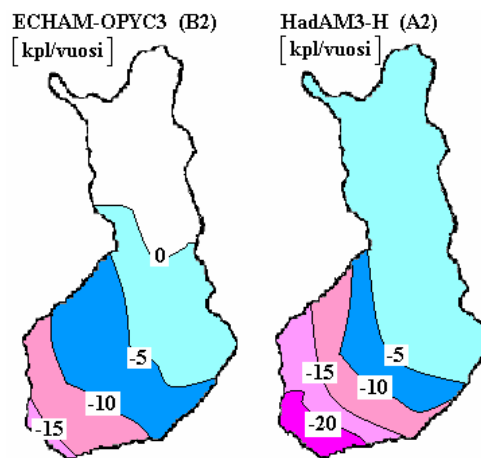
Taulukossa 6 on esitetty lämpötilojen ääriarvot Celsius-asteina vertailujaksolle 1961–1990 sekä ajanjaksolle 2016–2045. Ajanjakson 2016–2045 ääriämpötilat perustuvat suurimpiin ennustettuihin muutoksiin.

Taulukko 6. Ääriämpötilat Celsius-asteina ajanjaksoille 1961–1990 ja 2016–2045 (Ilmatieteen laitos 1991).

	Ääriämpötilat [°C]			
	1961–1990		2016–2045	
Helsinki	-35,9	31,9	-28,4	33,8
Tampere	-37,0	31,6	-30,0	33,5
Vaasa	-38,6	31,8	-31,6	33,7
Kuopio	-39,3	32,6	-32,6	34,6
Kuusamo	-45,2	31,2	-39,2	33,1
Sodankylä	-44,7	31,3	-38,8	32,9

Taulukossa 6 esitettyjen paikkakuntien maksimilämpötilat eivät juuri eroa toisistaan. Sen sijaan molempien ajanjaksojen minimilämpötiloissa on selvät erot pohjoisen ja eteläisen Suomen välillä. Suurimman muutoksen antaneen ennusteen mukaan Pohjois-Suomen minimilämpötilat lähestyvät vertailujakson Etelä- ja Keski-Suomen minimilämpötiloja.

Kuvassa 16 on esitetty kahden metrin lämpötilan nollarajan ylitysten/alitusten maksimimäärän muutokset lukumäärinä. Nollarajan ylitykset/alitukset on laskettu kuuden tunnin lämpötilan avulla. ECHAM4-OPYC3 antoi päästöskenaariolla B2 pienimmän muutoksen, ja HadAM3-H antoi päästöskenaariolla A2 suurimman muutosenennusteen.



Kuva 16. Ilmastomallien antamat ennustukset vuosien 2016–2045 lämpötilan nollarajan ylitysten/alitusten maksimimäärien muutokselle lukumäärinä. Nollarajan ylitykset/alitukset on laskettu kuuden tunnin lämpötilan avulla.

Mallien mukaan lämpötilan nollarajan ylitysten/alitusten maksimimäärät vähenevät. Pienimmän muutoksen antaneen ennusteen mukaan vähenemistä tapahtuu Lappia lukuun ottamatta koko maassa. Suurimman muutoksen antaneen ennusteen mukaan väheneminen vaihtelee Lapin viiden ja Lounais-Suomen 20 välillä.

Vertailujaksolla nollarajan ylitysten/alitusten lukumäärä oli Etelä-Suomessa huomattavasti suurempi kuin Pohjois-Suomessa. Ilmastomuutoksen myötä eteläisen Suomen olosuhteet lähenevät Pohjois-Suomen olosuhteita tältä osin. Muutosten tämän suuntaisen kehityksen selitettävissä sillä, että ajanjaksolla 2016–2045 Lapissa on vielä talviset olosuhteet ja lämpötila pysyttelee pääasiassa nolla-asteen alapuolella. Etelässä puolestaan lähestytään tilannetta, jossa lämpötila pysyttelee nollan yläpuolella pitempiä aikoja ja näin ollen nollan asteen ylitykset/alitukset vähenevät lukumääräisesti.

6.3 Tulvat ja maankosteus

Tulvien määrään vaikuttaa sadanta ja lämpötila. Talven lämpötilan kohoamisen myötä Etelä-Suomen pysyvän lumipeitteen olemassaoloaika lyhenee ja voi jonakin vuonna jäädä käytännössä kehittymättä. Etelä-Suomessa sateiden ennustetaan tulevan suurimmaksi osaksi vetenä ja satanut lumi sulaa nopeasti pois, jolloin vesisateet ja sulaminen voivat synnyttää talvitulvia. Talvitulvien syntyyn vaikuttavat talven sateisuus, lumen sulaminen ja talven erittäin pieni haihdunta. Pohjois-Suomessa ennustetaan säilyvän talviset olot, jolloin sade tulee yleisimmin lumena ja lämpötila on pääosin nollan alapuolella.

Tällä hetkellä etelän kevättulvat ajoittuvat tavallisesti huhtikuuhun ja pohjoisen toukukuuhun. On odotettavissa, että Etelä-Suomen kevättulvat aikaistuvat tai jopa väistyvät kokonaan. Keski-Suomen pienissä vesistöissä kevättulvat pienenevät ja aikaistuvat ja suurissa vesistöissä puolestaan latvareittien runsaat talvivirtaamat nostavat keskusjärvi-en pinnat keväällä korkealle. Pohjois-Suomen kevättulvat aikaistuvat ja niiden ennustetaan jäävän nykyistä pienemmiksi. Suurten kevättulvien riski kuitenkin säilyy keskimääräisen sadannan kasvun seurauksena.

Pohjaveden pinnan nousuun vaikuttaa sademäärien kasvu, lumen lisääntynyt sulaminen ja maan sulana pysyminen talvella nykyistä enemmän. Lämpimämmät kesät ja suurempi haihdunta pienentävät hiukan pohjaveden nousua. Pohjaveden noustessa maaperän kosteustilassa tapahtuu merkittävää kasvua.

6.4 Merenpinnan nousu

IPCC-ilmastoarvion mukaan valtamerenpinnat tulevat nousemaan ilmastomuutoksen seurauksena. Merenpinnan noususta noin puolet aiheutuu vuoristojäätikköjen osittaisesta sulamisesta ja mantereiden lumipeitteisten alueiden osittaisesta sulamisesta sekä puolet meriveden lämpölaajenemisesta.

Itämeren merenpinnan korkeuteen vaikuttavat valtameren lisäksi Itämereen laskevien jokien virtaamat sekä niiden vuodenaikainen jakautuminen. Itämeren merenpinnan kokonaisnousun ennustetaan olevan samaa suuruusluokkaa kuin valtamerillä. Suomenlahdella tämä merkitsee sitä, että maanpinnan kohoaminen kumoaisi keskimääräisen merenpinnan nousun. Pohjanlahdella ja Perämerellä merenpinnan lasku hidastuisi vähitellen. (Merentutkimuslaitos 2004)

Merenpinnan korkeudessa esiintyy lyhytaikaisia vaihteluita. Sateet, myrskyt ja vähäinen jääpeite voimistavat merenpinnan korkeuden lyhytaikaisia vaihteluita. Ilmastomallien

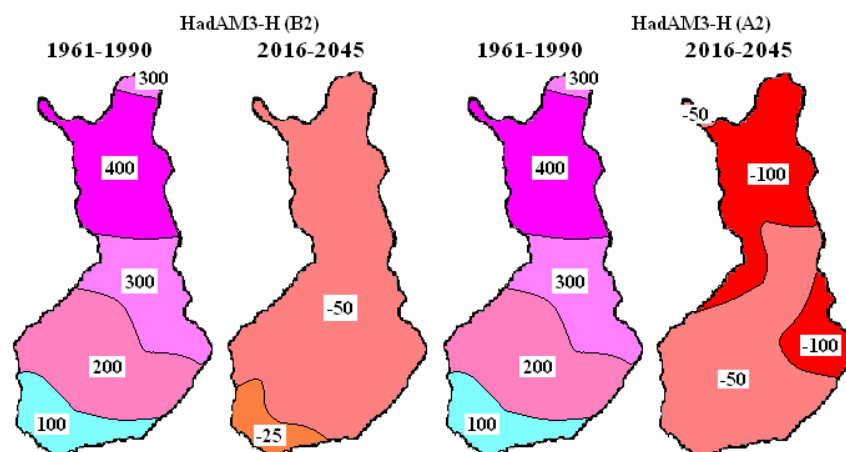
antamien ennusteiden mukaan onkin odotettavissa yhä voimakkaampia merenpinnan tason heilahteluita. Merenpinnan korkeuden maksimit eivät kuitenkaan arvioiden mukaan merkittävästi nouse, mutta lyhytaikaisia maksimeja esiintyy nykyistä enemmän.

6.5 Kuura ja huurre

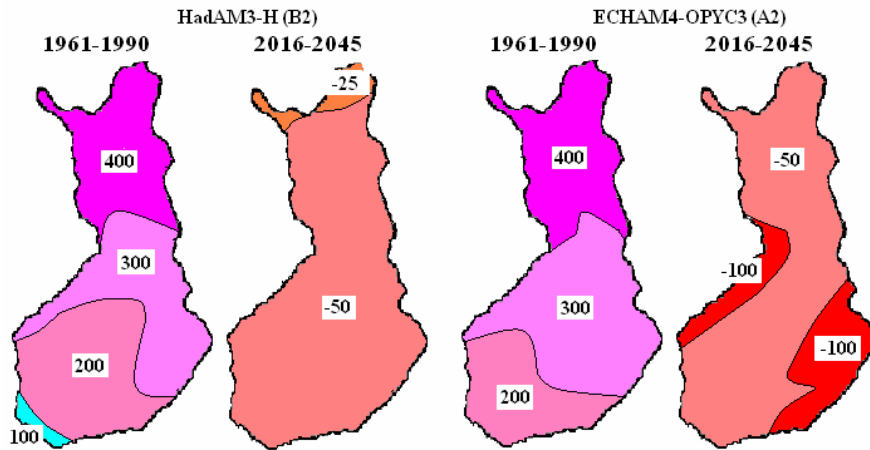
Kuura on seurausta härmistymisestä. Kuuraa muodostuu kosteuden tiivistyessä pakkasella suoraan vesihöyrystä jääksi tai kuuraksi. Huurretta puolestaan muodostuu, kun alijäähtyneet sumu- tai pilvipisarat osuvat kylmään alustaan ja jäätyvät saman tien. Huurre on usein kuuraa paksumpi, ja se voi kasvaa paksuksi painavaksi kerrokseksi eli tykyksi.

Kuuraantumisen aika tunteina kuukautta kohden on määritetty kahden metrin korkeudelle perustuen ilman lämpötilaan ja suhteelliseen kosteuteen. Tuloksena on saatu aika, jolloin lämpötila on kuurapisteessä. Tulokset soveltuvat myös huurteen esiintymisen tarkasteluun. On havaittu, että myös huurretta muodostuu nimenomaan kuurapisteessä.

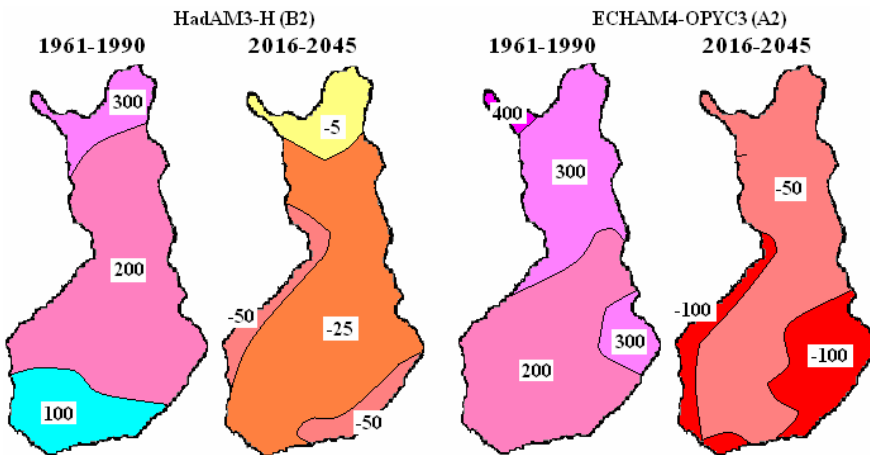
HadAM3-H- ja ECHAM4-OPYC3-ilmastomallien ja A2- ja B2-päästöskenaarioiden antamien tulosten erot ovat pienet. HadAM3-H antoi päästöskenaariolla B2 pienimmän muutoksen ja ECHAM4-OPYC3 antoi päästöskenaariolla A2 suurimman muutoksen. Kuvissa 17–19 on esitetty näiden kahden ilmastomallin ja päästöskenaarioiden antamat tulokset kahtena kuvasarjana. Kuvasarjoissa esitetään aika joulukuusta–helmikuuta, jolloin kuuraantumisen ja sen muutos ovat suurimmat.



Kuva 17. Kuuraantumisen keskimääräinen aika tunteina joulukuussa 1961–1990 ja ajanjaksolle 2016–2045 ennustettu keskimääräinen muutos. Vasemmanpuoleinen kuvasarja esittää pienintä muutosta, ja oikeanpuoleinen kuvasarja esittää suurinta muutosta.



Kuva 18. Kuuraantumisen keskimääräinen aika tunteina tammikuussa 1961–1990 ja ajanjaksolle 2016–2045 ennustettu keskimääräinen muutos. Vasemmanpuoleinen kuva-sarja esittää pienintä muutosta, ja oikeanpuoleinen kuvasarja esittää suurinta muutosta.



Kuva 19. Kuuraantumisen keskimääräinen aika tunteina helmikuussa 1961–1990 ja ajanjaksolle 2016–2045 ennustettu keskimääräinen muutos. Vasemmanpuoleinen kuva-sarja esittää pienintä muutosta, ja oikeanpuoleinen kuvasarja esittää suurinta muutosta.

Molemmat ilmastomallit antoivat käytetyillä päästöskenaarioilla samansuuntaiset kuuraantumisen esiintymisajan kehitykset. Ilmastomallien mukaan kuuraantumisen ja huurteen muodostumisen edellytyksenä olevat otolliset sääolosuhteet vähenevät ajallisesti.

Vaikka ennusteiden mukaan kuuraantumisen ja huurteen esiintymisen aika vähenee, niin se ei tarkoita välttämättä kaikkialla määrällistä vähenemistä. Ilmastomallien tuloksista ei voi päätellä, miten paljon kuuraa tai huurretta kertyy, kun lämpötila on kuurapisteessä. Eräiden arvioiden mukaan kuuran ja ennen kaikkea huurteen kertymä voi kasvaa paikallisesti. Ilmastomallien antamien ennusteiden mukaan talvet lämpiävät niin paljon, ettei Itämereen kehity jääpeitettä. Tällöin etelän ja lännen väliltä puhaltavat tuulet tuovat runsaasti kosteutta meren päältä ja lämpötilan ollessa sopiva kertyy kuuraa ja huurretta

huomattavan paljon jo lyhyessä ajassa. Erityisesti Vaara-Suomen (Kainuu, Pohjois-Karjala, Koillismaa) alueella kosteiden ilmassojen noustessa maaston vuoksi yleensä, voi huurteen kertymä olla jopa nykyistä suurempi.

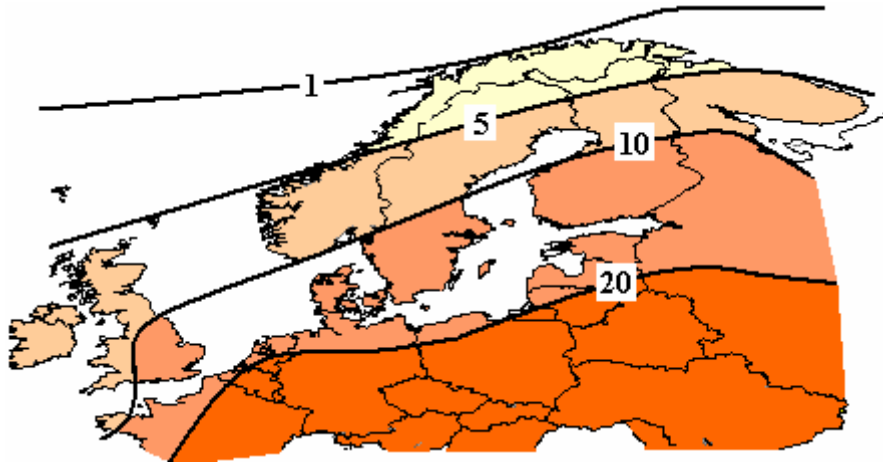
6.6 Ukkonen

Ukkosmäärien muutosta ei voida suoraan selvittää nykyisillä ilmastomalleilla, koska mallien tarkkuus ei ole riittävä. Tarkimmillaan ilmastomalleilla päästään noin 20 km tarkkuuteen. Erityisesti tyypillinen heinäkuun iltapäivän ukkonen eli ilmassaukkosen muodostuminen tapahtuu huomattavasti pienemmässä mittakaavassa. Tulevaisuuden ukkosmäärien kehitystä voidaan kuitenkin arvioida, kun tiedetään ukkospilven syntyymiseen vaikuttavat säättekijät. Ukkosen muodostumiselle ovat vaatimuksena nousevan ilman suuri kosteus ja ilmassojen voimakkaat pystyvirtaukset. Näitä tekijöitä saa aikaan esimerkiksi voimakkaan auringonpaisteen lämpövaikutus.

Ukkosen syntyminen on sitä todennäköisempää, mitä lämpimämpää on (Ilmatieteen laitos 2005d). Ilmastomallien mukaan kesät lämpiävät, ja siten on odotettavissa ukkostenkin lisääntymistä. Suomessa vuotuinen salamamäärä ja kesän keskilämpötilat korreloivat. Esimerkiksi heinäkuussa keskilämpötilan ja ukkosmäärien karkea riippuvuus on seuraavanlainen: keskilämpötilan ollessa 13 astetta on ukkostiheys nolla ja vastaavasti keskilämpötilassa 20 on ukkostiheys 0,5 kpl/km² (Tuomi 2005).

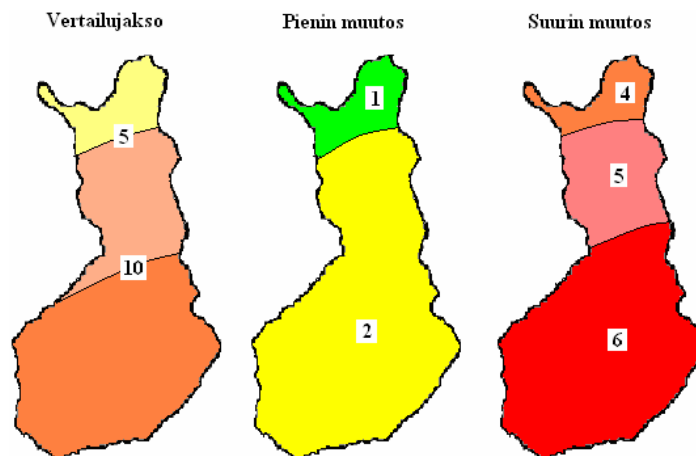
Pitkäaikaisten tilastojen mukaan sekä useimpia ukkospäiviä että runsaimpia salamamääriä on esiintynyt Salpausselän alueella ja Keski-Suomessa. Vähiten ukkosia on esiintynyt Pohjanmaan rannikolla ja Lapissa. Vaihtelut vuodesta toiseen ovat kuitenkin hyvin suuria. Ukkosten määrän ja voimakkuuden suhde on Suomessa sellainen, että on paljon vähän salamoivia ukkospäiviä ja harvoja runsaasti salamoivia ukkospäiviä.

Kesän keskilämpötilan kohoamisen myötä on odotettavissa, että ukkospäivien lukumäärää kuvaavat kerauniset tasot siirtyvät kohti pohjoista. Kuvassa 20 on esitetty tämän hetkiset isokerauniset tasot Pohjois- ja Keski-Euroopassa. Suomessa kerauniset tasot vaihtelevat tällä hetkellä Pohjois-Suomen noin viidestä Etelä-Suomen noin 15:een.



Kuva 20. Vallitsevat isokeraunisets tasot (ukkospäiviä/vuosi) Pohjois- ja Keski- Euroopassa.

Kuvassa 21 on esitetty suurimpaan ja pienimpään lämpötilan muutokseen perustuvat arviot Suomessa vallitsevista keraunisista tasoista ajanjaksolla 2016–2045. Pienimmän muutoksen arvio perustuu puolen asteen lämpötilan nousuun ja suurimman muutoksen arvio perustuu Etelä-Suomessa noin 1,5 asteen ja Pohjois-Suomessa noin yhden asteen lämpötilan nousuihin.



Kuva 21. Vallitsevat ukkosmäärät (ukkospäiviä/vuosi) isokeraunisilla tasoilla esitettynä ja lämpötilan muutoksiin perustuvat arviot vuosien 2016–2045 ukkosmäärien muutok-
sista vertailujaksoon verrattuna.

Pienimmän lämpötilan muutokseen perustuvan ennusteen mukaan keraunisets tasot vaihtelevat vuosina 2016–2045 Pohjois-Suomen noin viidestä Etelä-Suomen noin 17:ään. Ukkosmäärien kasvu on tällöin keraunisina tasoina Pohjois-Suomessa noin yksi ja muualla Suomessa noin 2. Suurimman lämpötilan muutokseen perustuvan ennusteen mukaan keraunisets tasot vaihtelevat vuosina 2016–2045 Lapin vajaasta kymmenestä Etelä-Suomen noin 21:een. Ukkosmäärien kasvu on tällöin keraunisina tasoina Pohjois-Lapissa noin neljä, Etelä-Lapissa noin viisi ja muualla Suomessa noin kuusi.

Taulukossa 7 on esitetty keskimääräiset salamatiheydet ja iskutiheydet sataa neliökilometriä kohti sekä ukkospäivät 315 000 neliökilometrin alueella vuosina 1988–2000. Tarkastelualueeseen kuuluu Suomen eteläpuolisko ja Etelä-Lappi.

Taulukko 7. Keskimääräiset salama- ja isku määrät Suomessa 1988–2000 (Ilmatieteen laitos 2005c).

Vuosi	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Salamat	99,0	34,6	12,6	34,2	33,2	17,7	52,3	53,8	10,8	41,1	36,7	39,4	35,9
Iskut	178,3	62,2	22,6	61,6	59,8	31,8	94,2	96,9	19,4	74,0	63,2	70,4	67,0
Ukkospäivät	18,1	11,6	9,8	12,9	12,6	10,5	10,9	11,5	6,0	17,2	12,0	11,5	13,3

Vuosien 1988 ja 1997 kesät olivat hyvin helteisiä ja kyseisinä vuosina onkin ukkospäiviä esiintynyt selvästi eniten. Salamoiden ja iskujen määrät ovat kuitenkin vuonna 1997 olleet pienemmät kuin vuosina 1994 ja 1995. Tässä pienessä otannassa näyttää siis siltä, että salamoinnin määrä ei kasva samassa suhteessa ukkospäivien lisääntymisen kanssa. On kuitenkin syytä olettaa, että ukkospäivien lisääntyessä myös salamoiden määrä kasvaa.

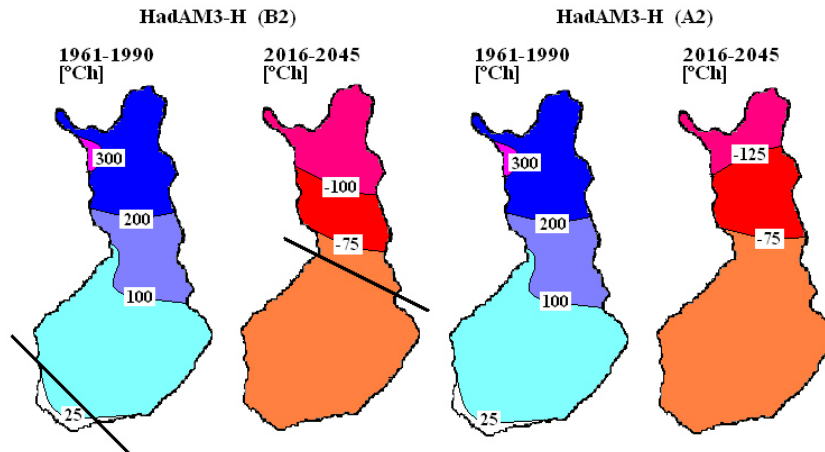
Tällä hetkellä noin 70 % kaikista salamaniskuista on pilvisalamoita ja noin 30 % on maasalamoita. Negatiivisten maasalamoiden huippuarvo on keskimäärin noin 30 kA, mutta voi poikkeuksellisesti olla jopa yli 100 kA. Positiiviset maasalamat ovat noin kaksi kertaa voimakkaampia kuin negatiiviset, ja niitä esiintyy Suomessa 10–15 % kaikista maasalamoista eli vajaa 5 % kaikista salamaniskuista.

6.7 Routa

Routaantumisen muutos on määritetty pakkassumman avulla. Routaantumisen katsotaan alkavan, kun pakkassumma ylittää 25 °Ch. Pakkassummalla tarkoitetaan niiden vuorokausikeskilämpötilojen summaa, jolloin keskilämpötila jää alle nollan. Pakkassumma on varsin luotettava roudan arviointimenetelmä lumettoman maan tapauksissa.

Kaikki neljä simulaatiota antoivat hyvin samansuuntaiset routaantumiseen vaikuttavat pakkassumman muutokset. Mallien mukaan pakkassumma pienenee syksyllä ja keväällä, ja näin ollen routajakso lyhenee koko maassa. Keski- ja Etelä-Suomessa maa on sula marraskuussa ja usein myös vielä joulukuussa. Lapissa maa on roudassa joulukuussa. On kuitenkin todennäköistä, että routaa kehittyy keskitalvella myös Etelä-Suomessa, koska lumipeitteen ohetessa maa jäätyy huomattavasti paremmin kuin paksun lumen alla.

Kuvassa 22 on esitetty marraskuun pakkassumman keskiarvoina vertailujaksoille sekä ajanjaksolle 2016–2045 ennustettu suurin ja pienin muutos. Pienimmän muutoksen antoi HadAM3-H-päästöskenaariolla B2 ja suurimman päästöskenaariolla A2.



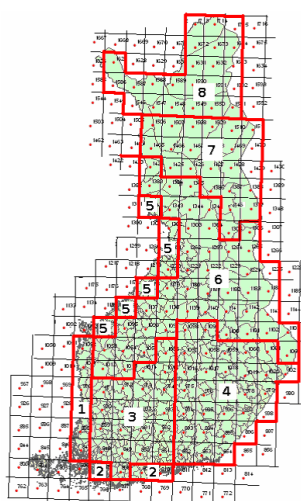
Kuva 22. Vuorokauden pakkassumman [$^{\circ}\text{Ch}$] keskiarvojen isoviivat marraskuussa vertailujaksolla ja ajanjaksolle 2016–2045 ennustettu keskimääräinen muutos. Vasemmanpuoleinen kuvasarja esittää pienintä muutosta, ja oikeanpuoleinen kuvasarja esittää suurinta muutosta. Musta viiva kuvaa routarajaa.

Ennusteiden mukaan pakkassumman muutokset ovat huomattavia marraskuussa. Lämpötilan nousun seurauksena marraskuun routaraja nousee Pori–Helsinki-akselilta Oulu–Nurmes-akselille.

6.8 Tuuli

Tuulen nopeudet on määritetty 10 metrin korkeudelle 10 minuutin keskituulen nopeuksina alueittain sekä maksimituulen muutokset hilaruuduittain. Lisäksi on esitetty ennuste kovien tuulten osumisesta roudattomaan aikaan.

Kuvassa 23 on esitetty Suomen karttapohjalla käytetyt hilapisteet sekä maa-alueen jako kahdeksaan alueeseen, joista osa on selkeästi tuulisuuden mukaista jakoa ja osa metsätyypin mukaista sekä 3 ja 4 eteläisen Suomen jako kahteen osaan helpottamaan kokonaisuuden hallintaa. Maaruutuja (yli 50 % maata + järviä) on kaikkiaan 157.



Alue	Ruutujen lukumäärä
1	6
2	3
3	20
4	30
5	7
6	45
7	23
8	23

Kuva 23. RCA2:n hilaruudut Suomen karttapohjalla esitettynä. Kuvassa on punaisella viivalla piirretty alueiden 1–8 rajat.

Taulukossa 8 on esitetty tuulen nopeuden nimityksiä ja vaikutuksia maalla. Tuulen nopeudella tarkoitetaan keskituulen nopeutta.

Taulukko 8. Tuulen nopeuden nimitykset ja vaikutus maalla.

Tuulen nopeus (m/s)	Tuulen nimitys	Tuulen vaikutus maalla
11–13	Navakkaa	Suuret oksat heiluvat
14–16	Kovaa	Puut heiluvat
17–20	Kovaa	Katkoo puiden oksia
21–24	Myrskyä	Katkoo puita
24–28	Myrskyä	Kiskoo puita juurineen
29–31	Myrskyä	Kaataa metsää
32 tai enemmän	Hirmumyrsky	Tuhoa perin pohjin rakennukset ym.

Tuulen nopeuden määrittäytapana on niin sanottu alueellinen tuntisumma. Alueellinen tuntisumma vastaa hyvin tuulien aiheuttamien tuhojen laajuutta ja siten todennäköisyyttä tuhojen esiintymiselle. Jos esimerkiksi malli antaa laajalla alueella tietyllä ajanhetkellä raja-arvoa suurempia tuulen nopeuksia, on kaatuneiden puiden määrä vastaavasti suurempi kuin että raja-arvo ylittettäisiin vain yhdessä ruudussa. Vastaavasti jos tuuli on pitkään yli raja-arvon, on kaatuneiden puiden määrä suurempi kuin että tietyssä pisteessä olisi vain hetken raja- arvon ylittäviä tuulia.

Taulukossa 9 on esitetty eri simulaatioiden antamat alueellisesti erittäin suurten tuulen nopeuksien esiintymisen (tuntia/vuosi/alue) suurimmat arvot ajanjaksolle 2016–2045, ja taulukossa 10 on esitetty vastaavat pienimmät arvot. Taulukoissa esitetyt tuulen nopeuden

raja-arvot vaihtelevat alueittain arvosta 10,5 m/s arvoon 12,5 m/s. Alueiden rajanopeudet on valittu tilastoitujen kovimpien tuulennopeuksien mukaan. Rajanopeudella tarkoitetaan tuulen suurinta 10 minuutin keskinopeutta. Tällaiset 10,5 m/s ja 12,5 m/s tuulet voivat sisältää rajuja puuskia, jotka kykenevät aiheuttamaan vahinkoa sähköverkoille.

Alueiden 1–6 ja 8 suurimmat arvot antoi ECHAM4-OPYC3 päästöskenaariolla B2 ja päästöskenaariolla A2 alueelle 7. HadAM3-H antoi pienimmät arvot alueille 1,2, 4–8 päästöskenaariolla A2 sekä alueelle 3 päästöskenaariolla B2.

Taulukko 9. Alueellisesti erittäin suurten tuulen nopeuksien esiintymisen (tuntia/vuosi/alue) suurimmat arvot ajanjaksolle 2016–2045 sekä arvojen muutokset verrattuna vertailujaksoon 1961–1990.

Alue	1961–1990	2016–2045	Muutos [%]	Rajanopeus [m/s]	Simulaatio
1	0,60	1,135	89	12,5	ECHAM4-OPYC3 (B2)
2	0,33	0,63	91	12,5	ECHAM4-OPYC3 (B2)
3	0,39	0,84	115	10,5	ECHAM4-OPYC3 (B2)
4	0,34	0,49	44	10,5	ECHAM4-OPYC3 (B2)
5	0,26	0,815	213	11,5	ECHAM4-OPYC3 (B2)
6	0,14	0,3	114	10,5	ECHAM4-OPYC3 (B2)
7	0,26	0,445	71	10,5	ECHAM4-OPYC3 (A2)
8	0,25	0,405	62	12,5	ECHAM4-OPYC3 (B2)

Taulukko 10. Alueellisesti erittäin suurten tuulen nopeuksien esiintymisen (tuntia/vuosi/alue) pienimmät arvot ajanjaksolle 2016–2045 sekä arvojen muutokset verrattuna vertailujaksoon 1961–1990.

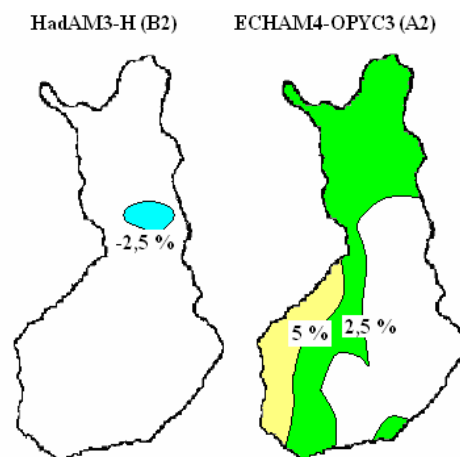
Alue	1961–1990	2016–2045	Muutos [%]	Rajanopeus [m/s]	Simulaatio
1	0,67	0,42	-37	12,5	HadAM3-H (A2)
2	0,13	0,1	-23	12,5	HadAM3-H (A2)
3	0,23	0,17	-26	10,5	HadAM3-H (B2)
4	0,11	0,085	-23	10,5	HadAM3-H (A2)
5	0,46	0,215	-53	11,5	HadAM3-H (A2)
6	0,06	0	-100	10,5	HadAM3-H (A2)
7	0,08	0,10	25	10,5	HadAM3-H (A2)
8	0,30	0,32	7	12,5	HadAM3-H (A2)

Simulaatioiden antamien suurimpien arvojen mukaan rajanopeuden ylittävien tuulen nopeuksien esiintyminen tulee yleistymään prosenttiluvuilla 44–213. Määrien kasvu on suurinta Pohjanlahden rannikolla, jossa erittäin suuria tuulen nopeuksia tulee esiinty-

mään kolme kertaa nykyistä enemmän. Vastaavasti pienimpien arvojen mukaan alueiden 1–6 määrät tulevat laskemaan 23–100 % ja alueiden 7 ja 8 kasvu jää 25 ja 7 %:iin.

Suurimpien ja pienimpien arvojen prosentuaaliset muutokset ovat suuret, ja mallien antamat muutosennusteet ovat toisiinsa verrattuna täysin erilaiset. Prosentuaaliset muutokset ovat suuria, koska tarkastellaan keskituulen nopeuksia, joita esiintyy tilastollisesti hyvin vähän. Tällöin pienikin määrällinen muutos näkyy suurena prosentuaalisena muutoksena. Tuulisuuden osalta HadAM3-H- ja ECHAM4-OPYC3-ilmastomallien antamien ennusteiden erot ovat yleisesti tiedossa. Erot johtuvat pohjoisen pallonpuoliskon ja erityisesti Pohjois-Atlantin ja sen ympäristön olosuhteiden parametrisoinnista, mutta todellista syytä tähän ei toistaiseksi kuitenkaan tiedetä. Selvityksen tekee vaikeaksi mallien kuukausia kestävä tietokoneajo, jolloin kokeilu eri parametreja muuttamalla ei käytännössä onnistu.

Kuvassa 24 on esitetty maksimituulennopeuden muutokset. Vasen kuva esittää pienintä ennustettua muutosta, ja oikea kuva esittää suurinta muutosta. Suurimman muutoksen antoi ECHAM4-OPYC3 päästöskenaariolla A2, ja pienimmän muutoksen antoi HadAM3-H päästöskenaariolla B2.



Kuva 24. Maksimituulennopeuden muutokset 10 metrin korkeudella. Vasemmalla pienin muutos ja oikealla suurin muutos.

Mallit antoivat kahdenlaiset tulevaisuuden näkymät maksimituulen voimakkuuksien muutoksista. Pienimmän muutoksen antaneen ennusteen mukaan maksimituulet vähenivät 2,5 % Etelä-Lapissa ja pysyvät muualla Suomessa nykyisellä tasolla. Suurimman muutoksen antaneen ennusteen mukaan kasvu on 2,5 % Lapissa ja Länsi-Suomessa ja 5 % Pohjanlahden rannikolla.

Suomessa esiintyy vuosittain myös trombeja. Trombi eli tornado on voimakkaassa pyönteisessä liikkeessä oleva, ukkospilven ja maan tai veden välinen ilmapatsas. Se on päi-

kallinen, suppea-alainen, lyhytaikainen pyörremyrsky, jossa tuulen nopeus nousee vähintään 21 m/s. Trombi aiheuttaa suurta tuhoa, siellä missä esiintyy. Trombi on vielä paikallisempi ilmiö kuin ukkonen, ja sen esiintymisen määriä tulevaisuudessa on mahdollon ennustaa ilmastomalleilla.

Taulukoissa 11–13 on esitetty kovien tuulien osumisesta roudattomaan aikaan. Tuulen nopeuden raja-arvona on 10,5 m/s, ja routakaudeksi katsotaan tapaukset, jolloin pakkassumma on hilaruudussa > 25 °Ch. Taulukossa 11 on vertailujakson laskentatulokset mallista ECHAM4-OPYC3, taulukossa 12 on laskentatulokset mallista ECHAM4-OPYC3 päästöskenaariolla A2 ja taulukossa 13 on laskentatulokset mallista ECHAM4-OPYC3 päästöskenaariolla B2.

Taulukko 11. Vertailujakson 1961–1990 tuulen nopeuden raja-arvon 10,5 m/s ylittävien tapausten (tuntia/vuosi) määrä jaettuna routakauden ja sulan tai lähes sulan maan luokkiin. Routakaudeksi katsotaan tapaukset, jolloin pakkassumma on hilaruudussa > 25 °Ch. Laskentatulokset mallista ECHAM4-OPYC3.

Alue	Ei routaa [h/a]	Routaa [h/a]	Roudattoman osuus [%]
1	2,33	2,70	46
2	3,80	0,77	83
3	0,08	1,00	7
4	0,05	1,40	3
5	0,54	1,13	32
6	0,00	1,07	0
7	0,07	0,73	9
8	0,56	13,2	4

Taulukko 12. Ajanjakson 2016–2045 tuulen nopeuden raja-arvon 10,5 m/s ylittävien tapausten (tuntia/vuosi) määrä jaettuna routakauden ja sulan tai lähes sulan maan luokkiin. Routakaudeksi katsotaan tapaukset, jolloin pakkassumma hilaruudussa > 25 °Ch. Laskentatulokset mallista ECHAM4-OPYC3 päästöskenaariolla A2.

Alue	Ei routaa [h/a]	Routaa [h/a]	Roudattoman osuus [%]
1	9,62	1,80	84
2	7,94	0,35	95
3	0,41	0,62	40
4	0,16	0,82	16
5	1,94	1,30	60
6	0,08	1,09	6
7	0,05	1,47	3
8	0,67	21,3	3

Taulukko 13. Ajanjakson 2016–2045 tuulen nopeuden raja-arvon 10,5 m/s ylittävien tapausten (tuntia/vuosi) määrä jaettuna routakauden ja sulan tai lähes sulan maan luokkiin. Routakaudeksi katsotaan tapaukset, jolloin pakkassumma hilaruudussa > 25 °Ch. Laskentatulokset mallista ECHAM4-OPYC3 päästöskenaariolla B2.

Alue	Ei routaa [h/a]	Routaa [h/a]	Roudattoman osuus [%]
1	7,62	2,79	73
2	7,00	0,74	90
3	0,56	0,82	40
4	0,23	1,15	16
5	1,37	1,62	46
6	0,08	1,54	6
7	0,04	0,58	6
8	0,56	21,0	3

Simulaatioiden mukaan todennäköisyys kovien tuulien osumiseen roudattomaan aikaan kasvaa alueilla 1–6 ja vähenee alueilla 7 ja 8.

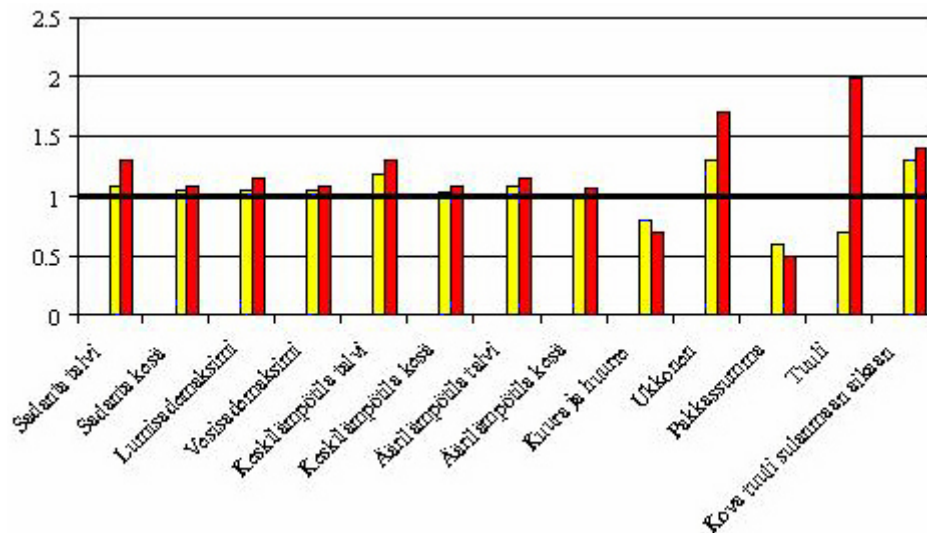
Vaikka mallien antamat tulokset eroavat toisistaan, toisen mallin ennustaessa tietyllä päästöskenaariolla tuulien vähenemistä ja toisen määrien kasvua, niin on kuitenkin syytä varautua tuulisuuden aiheuttaman uhkan lisääntymiseen. Suomessa koetaan voimakkaimmat kovat tuulet syksyllä ja talvella. Vaikka tuulien esiintyminen pysyisi ennallaan, niin tuulten aiheuttamat vahingot kasvavat, koska routaantuminen vähenee. Lisäksi ukkosmäärien arvioidaan lisääntyvän, jolloin ukkospilvistä puhaltavat puuskatuulet yleistyvät.

Tarkasteltaessa viimeaikaisia vahinkoja aiheuttaneita myrskyjä oli marraskuussa 2001 esiintynyt Janika-myrsky tuulenvoimakkuuden puolesta harvinainen lajissaan. Arvion mukaan vastaavanlaisia myrskyjä esiintyy noin 30–50 vuoden välein. Tällöin pahimman skenaarion mukaan vastaavan tuulennopeuden omaavan myrskyn esiintymistiheys on esimerkiksi alueella kolme ajanjaksolla 2016–2046 yksi 15–25 vuoden välein. Joulukuussa 2004 esiintyneen Rafael-myrskyn tuulennopeudet eivät olleet mitenkään poikkeavat. Vastaavan tuulennopeuden omaavia myrskyjä esiintyy noin 2–4 vuoden välein eli ajanjaksolla 2016–2045 esimerkiksi pääkaupunkiseudulla 1–2 vuoden välein. Tammi-kuussa 2005 Etelä-Ruotsissa laajaa tuhoa aiheuttaneen Gudrun-myrskyn esiintymistiheys on Etelä-Ruotsissa noin yksi 50 vuoden välein.

6.9 Yhteenveto ennusteista

Simulaatiot antoivat samansuuntaiset ennusteet jokaiselle tutkitulle ilmastomuuttujan muutokselle tuulisuutta lukuun ottamatta. Simulaatioiden mukaan sadanta ja lämpötila

kasvavat sekä keski- että ääriarvoilla mitattuina, ja kuuraantuminen sekä routaantuminen vähentyvät. Voimakkaat tuulet vähenevät pienimmän muutoksen antaneen ennusteen mukaan, ja suurimman muutoksen antaneen ennusteen mukaan voimakkaat tuulet tulevat lisääntymään. Kuvassa 25 on esitetty ilmastomuuttujien suhteelliset muutokset.



Kuva 25. Ilmastomuuttujien suhteelliset muutokset. Musta, vahvennettu viiva kuvaa vertailujakson arvoa, keltainen pylväs pienintä muutosta ja punainen suurinta muutosta.

Huomattavaa on, että ilmastomuuttujien keskiarvojen muutoksista on erittäin vaikea arvioida ääriarvojen muutosten käyttäytymistä. Esimerkiksi talven keskilämpötila nousee suurimman muutoksen antaneen ennusteen mukaan Kaakkois-Suomessa 3,5 astetta, kun taas minimilämpötilan ennustetaan nousevan 7,5 astetta.

7. Ilmastonmuutoksen vaikutukset

Tässä luvussa esitetyt asiat perustuvat pääasiassa VTT:llä, Fingrid Oyj:llä ja Fortum Sähkönsiirto Oy:llä pidettyihin palavereihin. VTT:n palaveri pidettiin ensimmäisenä ja tuolloin pohdittiin ilmastomuuttajien vaikutuksia sekä siirto- että jakeluverkkoon. Siirtoverkkoa koskevat pohdinnat käytiin läpi Fingridillä pidetyssä palaverissa, ja samalla Fingridin edustajat lisäsivät näkemyksiään. Jakeluverkkoa koskevat vaikutukset käytiin läpi vastaavalla tavalla Fortumilla.

Ilmastomuuttajien vaikutukset on esitetty ilmastomuuttajan muutoksen etumerkin mukaan. Eli onko muutos negatiivinen vai positiivinen. Tarkempi tarkastelu ei ole mielekäästä, kun otetaan huomioon ilmastomalleihin liittyvät epävarmuudet sekä ilmastomuuttajien vaikutusten luonne. Vaikutusten kuvaus on luonteeltaan pahimpien seuraamusten esittelyä.

7.1 Sadanta

Tässä luvussa esitellään sadannan, tulvien ja pohjanveden pinnan nousun vaikutukset. Tulvien ja pohjaveden pinnan määrän muutoksiin vaikuttaa sadannan ohella myös lämpötila.

Sadannan kasvu pehmentää maata ja heikentää samalla maan lujuutta. Erityisesti savi- ja hiesumaat pehmentyvät joko sadeveden tai pohjaveden nousun seurauksena. Pehmeä maa vaikeuttaa sähkölinjojen kunnossapitoon ja rakentamiseen käytettävien koneiden käyttöä. Pehmeä, liejuuntunut maa ei tue puita yhtä hyvin kuin kuiva, koska puiden juurien sitomiskyky heikkenee. Tällöin erityisesti rinteillä olevat puut voivat kaatua jakulinjoille tuulen vaikutuksesta helpommin. Pehmeä maa heikentää myös pylväiden perustuksia, jolloin kaatunut puu tuhoaa linjaa pidemmältä matkalta kuin normaalissa tilanteessa. Sateen tuoman veden muuttaessa maankoostumusta voivat rinteellä olevat maat lähteä liikkeelle ja siten aiheuttaa mekaanista räsitusta erityisesti pj- ja kj-verkoissa maakaapeleille. Siirtojännitteiset maakaapelit rakennetaan hiekkapedille, jolloin räsituksen syntymisen mahdollisuus on pienempi. (VTT 2005, Metsäntutkimuslaitos 2004, Heiskanen 2005)

Pohjaveden pinnan nousu on otettava huomioon uusien maakaapeleiden sijoittelussa ja nykyisten kaapeleiden kunnontarkkailussa. Vaikka kaapelit ovat periaatteessa vedenkestäviä, ne eivät välttämättä kestä jatkuvaa veden aiheuttamaa räsitusta. Siirtoverkossa ei käytetä maakaapeleita, ainoastaan sähköasemilla. Sähköasemien salaojitukseen ja niiden toimimiseen onkin kiinnitettävä huomiota. Pohjaveden nouseminen on otettava huomioon myös pylväiden perustuksia tehtäessä, koska vesi aiheuttaa pylvääseen voiman nousun kautta. Pohjaveden pinnan nousu ja sademäärien kasvu lisää korroosiota ja aiheut-

taa lahoa. Metallirakenteiden korroosiota indikoidaan märkäajalla, jolla tarkoitetaan aikaa, jolloin suhteellinen kosteus on yli 80 % ja lämpötila on korkeampi kuin 0 °C. Märkäaika lisääntyy ajanjaksoon 2016–2045 mennessä 15–25 % ja näin ollen korroosiolle suotuisat olosuhteet lisääntyvät. Maaperän kostuminen lisää laholle suotuisia olosuhteita. Kokeiden mukaan lahosienelle suotuisat kosteustasot vaihtelevat 40–80 %. Laho tuhoaa puupylväitä ja on siten erittäin merkittävä haitta erityisesti jakeluverkossa. (VTT 2005, Fingrid 2005b)

Sateiden ja pohjaveden nousun seurauksena maan johtavuus paranee ja samalla kasvaa haruskorroosioriski. Tällä on vaikutusta harustetuille pylväille, joissa on maadoitetut orret. Yleensä harukset ovat terästä ja pylväsmaadoitus ja potentiaalintasausedelektrodi kuparia. Metallien välille syntyy hyvin johtavassa maassa korroosiovirta, joka aiheuttaa harusten syöpymistä. Ajan mittaan syöpyminen voi edetä niin pitkälle, että harus katkeaa. Tämä aiheuttaa turvallisuusriskin verkoston käyttöön sekä kunnossapitoon. Harukset on suojattu tähän asti sinkityksellä, mutta on todettu, ettei se estä harusten syöpymistä maanpinnan alapuolella kosteissa olosuhteissa. (Elovaara & Laiho 2001, Energiasanommat 2002)

Sadannan kasvu lisää koronahäviöitä erityisesti uusilla johdoilla. Korona on kaasuisa elektrodin pinnalla esiintyvä osittaispurkaus, joka ottaa tarvitsemansa energian elektrodin pinnalta ja on siten johdoilla esiintyessään huomattava häviöiden aiheuttaja siirtöjännitteisillä johdoilla. Uuden johtimen pinta on rasvainen, jolloin sadepisaroihin kertyy johtimen pinnalle helposti. Sähkökentän vaikutuksesta pisarat venyvät pitkiksi ja pysyvät johtimen pinnalla kauemmin aiheuttaen koronaa. Vuosien saatossa johtimen rasvaisuus häviää ja pinta kuluu. Pinnaltaan kuluneella johtimella vesi tunkeutuu säikeiden väliin, ja pisarat tippuvat alapuolelta nopeasti. Tästä johtuen vuosia käytetyllä johtimella on pienemmät koronahäviöt, vähemmän häiriöitä ja vähemmän voimakkaan koronan pisteitä kuin uudella johtimella. (Aro et al. 2003, Fingrid 2005b, VTT 2005)

Tykkylumelle suotuisia tekijöitä ovat sadannan lisääntyminen talvella niin keskiarvoilla kuin maksimiarvoilla mitattuina sekä lämpötilan nousu. Tykkylumella tarkoitetaan puisia ja rakenteissa olevaa lunta ja huurretta, joka kerää itseensä lisää lunta. Lämpötilan nousun myötä suojasäät yleistyvät, jolloin räntäsateen mahdollisuus kasvaa. Räntänä satava lumi takertuu helposti puiden oksiin. Kun ilma pakastuu, räntä jäätyy oksiin kiinni ja kerää ympärilleen uutta, kuivaakin lunta. Lumisateiden jatkuessa muodostuu oksiin painava lumikerros eli tykky. Tykyn painon alla oksat tai jopa kokonaiset puut taipuvat jakelulinjalle aiheuttaen pysyvän vian. Erityisesti solakkarunkoiset lehtipuut ovat herkkiä taipumaan tykyn painon alla.

Vesi- ja räntäsateet sekä niitä seurannut lämpötilan lasku muodostavat uhkan verkostossa oleville suojaamattomille erottimille sekä katkaisijoille. Kytkinlaitteiden toiminnan luotettavuus heikkenee veden ja lumen jäätyessä laitteiden ympärille. (Fortum 2005)

Rankkasateiden seurauksena kaupunkitulvat ovat mahdollisia, kun taajamien viemärointi ei ehdi imeä vettä kaduilta. Tällöin on vaarana, että vesi pääsee rakennusten kellareihin vahingoittamaan kellarimuuntajia. Tulvat uhkaavat myös kaapeliverkkoja ja jakokaappeja. (VTT 2005)

Suurten kevättulvien riski säilyy Lapissa. Jokien tulviessa veden mukana kulkee jäälauttoja, jotka aiheuttavat virtaavien vesimassojen ohella uhkan tulva-alueilla oleville pylväille ja muuntajille. (Fingrid 2005b)

Merenpinta voi nousta Suomenlahdella lännen puolelta puhaltavien myrskytuulten vaikutuksesta niin korkealle, että se uhkaa verkstorakenteita. Uhka on sekä hetkellinen että paikallinen.

Keskimääräisen sadannan kasvun seurauksena on oletettavaa, että rankkasateiden ja tihkusateiden määrät kasvavat nykyisestä. Tihkusade on vaikutukseltaan samankaltainen kuin sumu. Molemmat aiheuttavat ongelmia, kun eristinlautaset ovat likaantuneet. Kosteus muodostaa likaantuneelle eristinlautasen pinnalle tasaisen johtavan kalvon, jota pitkin ylilyönti helposti tapahtuu. (Auvinen 1997)

Sadannan kasvu lisää myös positiivisia tekijöitä. Sadannan kasvu parantaa maadoitusolosuhteita, koska kostea maa johtaa sähköä paremmin kuin kuiva. Toinen hyvä puoli on voimakkaan sateen puhdistusvaikutus siirtojännitteisten johtojen eristimissä. Esimerkiksi siitepöly johtaa sähköä orgaanisena aineena ja voi siten muodostaa maasulun yhdessä kosteuden kanssa. Voimakas sade kykenee huuhtomaan siitepölyn eristimistä ja näin ennalta ehkäisee vian muodostumisen.

7.2 Lämpötila

Lämpötilalla on huomattavia epäsuoria vaikutuksia kuten esimerkiksi vaikutus routaan, tulviin ja sateena tulevan veden olomuotoon. Tässä luvussa esitellään suorat vaikutukset.

Lämpötilan muutos vaikuttaa virtalämpöhäviöiden suuruuteen. Lämpötilan noustessa kasvaa aineen ominaisresistiivisyys, joka kasvattaa johtimien resistanssia. Resistanssin kasvaessa kasvavat samalla virtalämpöhäviöt. Virtalämpöhäviöiden muutokset vaikuttavat johtimien ja muuntajien kuormitushäviöihin. Kahden asteen lämpötilan nousu lisää teräksen ominaisresistiivisyyttä 0,16 %, alumiinin 0,86 % ja kuparin 1,36 %. Virtaläm-

pöhäviöt ovat suoraan verrannollisia resistiivisyyden muutoksiin, jolloin häviötehot kasvavat edellä mainituin luvuin riippuen johtimien ja muuntajakäämien johdinmateriaaleista.

Lämpötilan muutos vaikuttaa sähkönkulutukseen ja huipputehoon. Taulukossa 14 on esitetty muutaman sähkönkäyttäjryhmän sähkönkulutuksen ja huipputehon muutokset. Liitteessä 1 on esitetty vastaavat luvut käyttäjäryhmittäin. Sähkönkulutus sekä huipputeho on määritetty tyyppikuormituskäyriä ja niiden lämpötila-korjauskertoimia hyväksi käyttäen.

Taulukko 14. Sähkönkulutuksen ja huipputehon muutokset muutamalla käyttäjäryhmällä. Sähkönkulutuksen muutokset perustuvat keskilämpötilojen muutoksiin ja huipputehon muutokset perustuvat ääriämpötilojen muutoksiin. Pienin muutos on laskettu pienimmillä ennustetuilla lämpötilojen muutoksilla ja suurin muutos on laskettu suurimmilla ennustetuilla lämpötilojen muutoksilla. Lämpötilojen muutosennusteet on esitetty luvussa 6.2.

Käyttäjryhmä	Sähkönkulutuksen muutos [%]		Huipputehon muutos [%]	
	pienin	suurin	pienin	suurin
Muu teollisuus yhdistetty	-0,3	-0,6	-1,2	-1,8
Julkiset palvelut	-0,1	-0,2	-0,4	-0,7
Maataloudet	-1,7	-3,2	-4,4	-6,6
Sähkölämmitys yhdistetty	-2,8	-5,0	-5,6	-8,3
Omakotitalo, kaksoislämmitys, 1-aikatariffi	-3,4	-6,1	-6,8	-10,1
Tavaratalot ja marketit	0,5	1,2	0,0	2,4
Hotelli- ja majoitustoiminta	-1,5	-2,8	-4,1	-6,1
Ravintola- ja kahvilatoiminta	0,2	0,6	0,0	2,2
Rahalaitos- ja vakuutustoiminta	0,4	0,8	0,0	2,1

Lämpötilan nousu merkitsee pienempää lämmityksen tarvetta, jolloin sähkönenergian tarve ja samalla siirtotarve pienenee. Sähkönkulutuksen vähentyminen vaikuttaa verkko-yhtiöiden tuloihin. Vaikutus on suurin lähdoillä, joiden kuormitukset ovat voimakkaasti lämpötilasta riippuvaisia kuten esimerkiksi sähkölämmitteiset omakotitalot. Lämmitystarpeen väheneminen vaikuttaa myös Fingridin tuloihin, mutta vaikutus on suhteessa huomattavasti pienempi kuin jakeluyhtiöillä. Lämmitystarpeen vähenemisen vaikutusta pienentää sähkönenergian tarpeen jatkuva kasvu, mikä pienentää tai kumoaa kokonaan ilmastonmuutoksen vaikutuksen riippuen kuormituksesta. Ennusteiden mukaan sähkönkulutus kasvaa ensi vuosikymmenen puoliväliin asti noin 1,7 prosenttia vuodessa ja sen jälkeen vajaan prosentin vauhtia. (VTT 2005, Fingrid 2005b)

Monien käyttäjäryhmien huippukuormitus on kesällä helteiden aikaan johtuen suuresta jäähditysenergian tarpeesta. Lämpötilan kohotessa jäähditysenergian tarve kasvaa ja samalla kasvaa huipputeho. Ennusteiden mukaan huipputeho kasvaa muun muassa tavarataloilla ja marketeilla maksimissaan vajaan 2,5 %. Kesäisellä huipputehon kasvulla on kuluttava vaikutus tiettyihin verkostokomponentteihin. Muuntajia on mahdollista kuormittaa huomattavasti mitoituskuormitusta suuremmalla teholla talvella kovien pakkasten aikaan. Tämä ei kuitenkaan onnistu kesällä ilman suurta muuntajan tuhoutumisen vaaraa. Kaapeleiden mitoitusena on terminen kestoisuus. Talvella maan ollessa jäässä voi kaapeleita kuormittaa suuremmalla virralla kuin kesällä. Avojohtojen kuormitettavuuteen lämpötilalla ei ole vaikutusta, koska avojohdoilla jännitteenalenema kasvaa liian suureksi ennen termisen kestoisuuden ylärajaa.

Lämpötilan nousu pidentää kasvukautta. Kasvukauden pidentyminen merkitsee pidempää puiden vuosittaista kasvua niin pituus- kuin leveyssuunnassa. Arvion mukaan nopeakasvuisten lehtipuiden, kuten esimerkiksi haavan, vuosittainen kasvu kasvaa noin 10 % (Kellomäki 2005). Tämä merkitsee raivaustarpeen kasvua. Pidempi kasvukausi heikentää myös pylväspuiden laatua nopeuttamalla vuosikasvu. (VTT 2005, Fortum 2005)

Suomen ja Ruotsin välisen yhdysjohdon siirtotehon määrää terminen kestoisuus (Fingrid 2005b). Yhdysjohtoja on kaksi kappaletta, joista toinen toimii koko ajan varajohtona. Lämpötilan noustessa terminen yläraja saavutetaan helpommin, jolloin yhdysjohdon siirtokapasiteetti laskee. Vuosilämpötiloja tarkasteltaessa kahden asteen lämpötilan nousu pienentää kapasiteettia noin 2,5 %.

Minimilämpötilan nousu tuo mukanaan positiivisia tekijöitä. Ennusteiden mukaan ääriämpötilat nousevat, ja samalla kovien pakkasten aiheuttamat viat vähenevät tai häviävät kokonaan. Kova pakkanen voi aiheuttaa vikoja erottimille, katkaisijoille sekä suoja-laitteille ja jopa katkaista johtoja. Lisäksi ongelmia voi olla ajoneuvokaluston käytössä. Pakkasella lyhyetkin keskeytykset voivat olla asiakkaalle hyvin haitallisia.

Lämpötilan nollarajan ylitysten/alitusten määrien vähentyminen Etelä-Suomessa vähentää erityisesti puupylväisiin sekä betonirakenteisiin kohdistuvia rasituksia. Rasituksia syntyy, kun lämpötilan ollessa nollan yläpuolella vesi imeytyy rakenteisiin, ja lämpötilan laskiessa nollan alapuolelle vesi jäätyy ja samalla laajenee rakenteiden sisällä ja siten aiheuttaa kulumista.

7.3 Kuura ja huurre

Kuura ja ennen kaikkea huurre aiheuttavat koronapurkauksia. Huurteisen johtolähdön koronahäviöt riippuvat huurteen paksuudesta, koostumuksesta ja lämpötilasta. Huurteen paksuuden lisääntyminen kasvattaa koronahäviöitä. Huurteisen johdon häviöt ovat suurimmillaan lämpötilan ollessa lähellä nollaa ja pienenevät lämpötilan laskiessa, ja noin $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilassa 400 kV:n johdolla koronahäviöitä ei enää esiinny. Ilmanlämpötila vaikuttaa koronahäviöihin, koska lämpötilan laskiessa ilman tiheys ja samalla koronan syttymisjännite kasvaa. Vanhimmalle Suomessa käytetylle 420 kV:n kolmivaihejohtotyypille on laskettu johdon koronahäviöiksi kauniilla säällä 0,8 W/m (keskivaiheessa 0,34 W/m ja ääri vaiheissa 0,23 W/m) ja huurteessa 60 W/m (keskivaiheessa 26 W/m ja ääri vaiheissa 17 W/m). Keskivaiheessa koronahäviöt ovat suuremmat keskivaihejohtimen pinnalla olevasta suuremmasta kentänvoimakkuudesta johtuen. (Aro et al. 2003, Lahti et al. 1996)

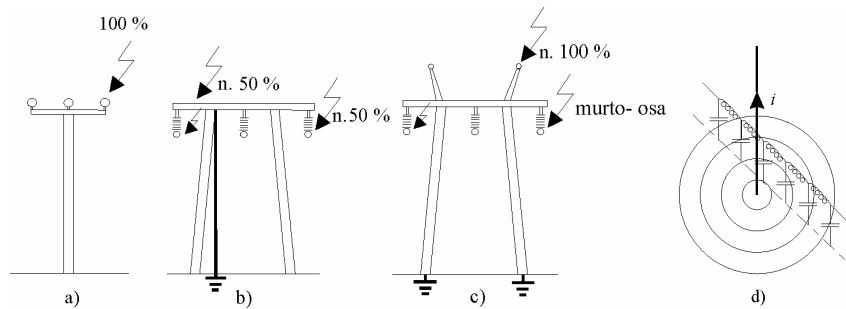
Yksi tykkyä muodostava tekijä on huurre. Tykkyä syntyy, kun alijäähtyneet vesipisarat törmäävät oksistoon jäätyen huurrekiteiksi. Jakeluverkossa tykkylunta voi kertyä johdoille niin paljon, että johdot painuvat voimakkaasti notkolle ja voivat pahimmassa tilanteessa katketa. Toisen ja edellistä todennäköisemmän ongelman aiheuttaa tykyn kertyminen puihin, jolloin oksat tai jopa puut painuvat lumen painosta ilmajohtojen päälle. Tykylle alttiilla alueella huurretta saattaa kertyä puiden oksille muutamassa pakkastunnissa useita senttimetrejä. Siirtoverkoissa tätä vaaraa ei ole olemassa, koska siirtoverkko rakennetaan puuvarmaksi.

Tykkylumi aiheuttaa ongelmia myös siirtojännitteisillä johdoilla. Pahimmillaan johtimen ympärille on kertynyt yli kymmenen senttimetrin paksuinen lumi- ja huurrepeite. Vaihejohtimiin kertyvä tykky jää kuitenkin yleensä merkityksettömäksi riippuman kanalta johdossa kulkevan virran aiheuttaman lämpövaikutuksen ansiosta. Todennäköisemmän ongelman aiheuttaa ukkosköysiin kertyvä tykky. Ukkosköysi voi painua lumen painosta vaihejohtimen tasolle. Tuulen vaikutuksesta ukkosköysi voi heilahtaa vaihejohtimeen, jolloin seurauksena on maasulku. Pahimmassa tapauksessa lumikuorma ylittää ukkosköyden mekaanisen lujuuden. Tällöin ukkosköysi katkeaa ja voi aiheuttaa pysyvän maasulun pudotessaan vaihejohtimeen päälle. (Fingrid 2005b)

7.4 Ukkonen

Ukkonen aiheuttaa keskeytyksiä sähköntoimitukseen sekä salamoinnin että puuskaisen tuulen vaikutuksesta. Seuraavassa on esitetty salamoinnin vaikutukset. Puuskaisen tuulen vaikutus on esitetty luvussa 7.6 tuuli.

Tällä hetkellä salamointi on selvästi merkittävin vikojen aiheuttaja siirto- ja jakeluverkoissa. Salamot aiheuttavat sähköjohtoon rasitteita muodostamalla johtoon transienttiyli-jännitteitä. Ylijännitteet syntyvät kolmella eri tavalla: suora isku vaihejohtimeen, johdon maadoitettuun osaan osuneen iskun aiheuttaman takaiskun kautta tai induktion seurauksena. Kuvassa 26 on esitetty salaman aiheuttamien ylijännitteiden muodostuminen verkkoon.



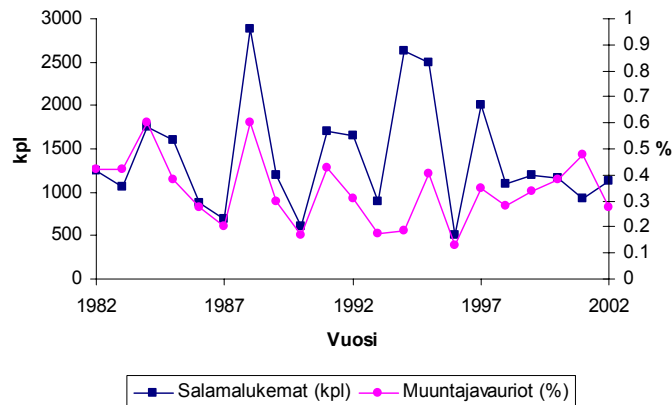
Kuva 26. Salaman aiheuttamien ylijännitteiden muodostuminen verkkoon: a) Orsi maasta eristetty. Salamaniskun seurauksena kolmivaiheinen oikosulku, b) orsi maadoitettu, c) ukkosköysillä varustettu maadoitettu pylväs, d) salamavirran aiheuttama sähkömagneettinen induktio.

Ylijännitteet aiheuttavat maa- ja oikosulkuja tai pahimmillaan laitevaurioita ja sitä kautta pitempiäaikaisia sähköntoimituksen keskeytyksiä. Maa- ja oikosuluista voi seurata sähkökäyttäjälle ikäviä jännitekuoppia. Oikosulut aiheuttavat jännitekuoppia sekä jakelu- että siirtoverkkoon. Maasulut aiheuttavat jännitekuoppia ainoastaan siirtoverkkoon. Jännitekuopat ovat erityisen haitallisia prosessiteollisuudelle, jossa yksittäinen jännitekuoppa voi pysäyttää koko prosessin ja näin aiheuttaa mittavat vahingot. Teollisuusverkkojen maasulkutilanteet eivät Suomessa tavallisesti aiheuta merkittäviä jännitekuoppia, koska maasulkuvirrat jäävät pieniksi verkkojen maadoitustavoista johtuen (Kumpulainen et al. 2002). Jo nykyisillä salamamäärillä on ongelmia jännitekuoppien kanssa ja ukkosmäärien kasvun myötä on odotettavissa, että jännitekuopat ja niiden aiheuttamat ongelmat yleistyvät.

Jakelujännitteillä salamasta aiheutuvat ylijännitteet muodostuvat lähes aina indusoitumalla. Indusoitumalla syntyneiden ylijännitteiden polariteetti on sama kaikissa vaiheissa. Indusoituneen ylijännitteen rinta on loiva, noin 10 μ s. Huippuarvo on tavallisesti pieni, noin 200–300 kV, mutta suurivirtainen salama voi aiheuttaa jopa 500 kV:n jännitetasituksen. Tällaiset salamaniskut ovat mahdollisia puiden suojaamalla, metsässä kulkevilla johdoilla. (Aro et al. 2003)

Usein salaman aiheuttamasta viasta selvittäään pj:n avulla, mutta joskus ylijännitteet aiheuttavat pysyviä vaurioita johdoille tai muuntajille. Ukkonen on tällä hetkellä selvästi yleisin maaseudun jakelumuuntajavaurioiden aiheuttaja (Keskeytystilasto 2002). Jake-

lumuuntajavaurion sattuessa keskeytysaika on yleensä enintään muutamia tunteja riipuen muun muassa tarvittavista toimenpiteistä ja maantieteellisestä sijainnista. Salama voi vaurioittaa myös kaapeliverkkoja, jolloin keskeytysajat ovat pidempiä. Kuvassa 27 on esitetty salamamäärien vuosikeskiarvot ja ukkosen vaurioittamien jakelumuuntajien osuus (%) maaseudun jakelumuuntajista vuosina 1982–2002.



Kuva 27. Salamanlaskijoiden vuosikeskiarvot ja ukkosen vaurioittamien jakelumuuntajien osuus (%) maaseudun jakelumuuntajista vuosina 1982–2002 (Keskeytystilasto 2002).

Suorat salamaniskut ja takaiskut ovat merkittäviä siirtojännitteisillä johdoilla. Suoran salaman iskun synnyttämät ylijännitteet ovat suuruusluokaltaan megavoltteja. Salama voi aiheuttaa laajoja keskeytyksiä, jos ylijännitteet vaurioittavat sähköasemien laitteita tai siirtoverkkoja.

Suurivirtaiset salamat voivat aiheuttaa suorissa salamaniskuissa n-2-vikoja siirtojännitteisissä yhteispylväissä (Fingrid 2005b). Tämä on merkittävä tekijä muun muassa Venäjän siirtolinkissä, jossa on käytössä yhteispylväitä. Tämän hetkinen Venäjän linkin siirtokapasiteetti on 1 400 MW, mutta kesällä on usein huoltotöitä, jolloin siirtokapasiteetti on huomattavasti tavanomaista pienempi.

7.5 Routa

Fingridille roudantumisessa tapahtuvat muutokset ovat yksi huomattavimmista ilmastomuuttujien muutoksista. Kantaverkkoa rakennetaan ja huolletaan pääasiassa roudan aikaan. Routakauden lyhentyminen tai pahimmillaan roudan puuttuminen kokonaan merkitsee huomattavia lisäkustannuksia. Lisäkustannuksia tulee, kun joudutaan hankkimaan tai kehittämään uutta kunnossapitotekniikkaa, kun vanhat laitteet eivät enää sovellu tehtäviinsä. Tämän hetkinen lähtökohta on, että kolmesta vuodesta ainakin kahdena kehittyy hyvä routa. (Fingrid 2005b)

Jakeluverkkojen rakentamiseen ja huoltamiseen roudan vähentyminen on sekä hyvä että huono asia. Roudan vähentyminen mahdollistaa matalammat kaapeliojat ja mahdollistaa kaapeloinnin myös talvella, jos routakerros on alle 20 cm. Roudan vähentyminen vaikeuttaa pylvästöitä, koska sula maa ei kannata painavia koneita. Routa rasittaa erityisesti maakaapeleita ja pylväitä liikuttelemalla maata ja nostamalla kiviä. Roudan vähentyminen pienentää siten maakaapeleihin ja pylväisiin kohdistuvia rasituksia. (Fortum 2005)

Roudattomuus ei tavallisesti aiheuta ongelmia haruksille. Ongelmia saattaa kuitenkin ilmetä, jos maan sulaminen ja jäätyminen vaihtelee useita kertoja talven aikana. Tällöin harukset voivat löystyä. (Fingrid 2005b)

Roudalla on merkittävä vaikutus puiden pysymiseen pystyssä voimakkaissa tuulissa. Routa luo lujan perustuksen puun juurille. Vaikka tuulisuus pysyisi nykyisellään, aiheuttavat kovat tuulet tulevaisuudessa enemmän puun kaatoja ja sitä kautta tuhoja jakeluverkkoon kuin tällä hetkellä, koska roudan antama suoja vähenee tai puuttuu pahimmillaan kokonaan.

7.6 Tuuli

Tuulet ovat merkittävin ilmastollinen uhka erityisesti sähkönjakeluverkkoa kohtaan. Esimerkiksi vuonna 2004 joulukuussa riehunut Rafael-myrsky aiheutti energiayhtiö Fortumille kaikkiaan vajaan viiden miljoonan euron vahingot. Asiakkaille hyvitetävien vakiokorvausten summaksi muodostui noin 1,5 milj. €.

Suomessa esiintyy normaalisti kovimpia tuulia syksyllä ja talvella. Navakat ja kovat tuulet voivat sisältää rajuja puuskia, jotka kykenevät kaatamaan puita sekä lennättämään oksia verkon päälle ja siten aiheuttamaan sähkönjakelun keskeytyksiä. Myös kesällä ukkospilvestä puhaltavat voimakkaat syöksyvirtaukset voivat aiheuttaa merkittävää vahinkoa. Heikoimmat puut alkavat kaatua tuulen nopeudella 17 m/s ja suuria tuhoja alkaa syntyä, kun tuulen nopeus nousee 20–23 metriin sekunnissa (Metsäntutkimuslaitos 2004).

Usein vian aiheuttaa yksittäinen johdon päälle kaatunut puu. Useiden puiden kaatuessa linjalle eivät johtimet ja pylväät jaksa kannatella niitä, vaan linjaa tuhoutuu pidemmältä matkalta. Tällöin johtoja ja muuntoasemia joudutaan rakentamaan uudelleen. Jakeluverkosta noin puolet sijaitsee metsissä. Siirtoverkot rakennetaan puuvarmoiksi, jolloin tätä uhkaa ei ole olemassa.

Metsällä ja sen hoidolla on merkittävä vaikutus jakeluverkkoihin kohdistuviin vahinkoihin. Usein kovien tuulien sattuessa, puita kaatuu puunkorjuualueiden laidoilta. Lin-

jan lähelle jätetyt metsäkaistat ja siemenpuut muodostavat siten selkeän uhan sähkölinjoille. Myös lannoitetut ja harvennetut metsät ovat alttiimpia tuulen aiheuttamille tuhoille. Harvennuksen ja lannoituksen jälkeen menee aikaa muutama vuosi ennen kuin puuston juuristo on kyennyt sopeutumaan uusiin olosuhteisiin, ja tuhoriski verrattaessa käsittelemättömään metsään on palautunut ennalleen. (Metsäntutkimuslaitos 2004)

Havupuut ovat tavallisesti herkempiä kaatumaan tuulen voimasta kuin lehtipuut. Lehtipuiden tuulituhoriskiin vaikuttaa merkittävästi vuodenaika. Talvella lehtipuut kestävät varsin hyvin kovaakin tuulta, mutta kesällä lehvästö lisää tuulituhoriskiä. Kuusi on suurlatvuksisena ja juuristoltaan pinnallisena puulajina pääpuulajeistamme herkin kaatumaan tuulen voimasta. Mänty kestää tuulta paremmin kuin kuusi, koska männyllä on syvemälle ulottuva juuristo ja suhteellisesti pienempi latvus. (Metsätuhotyöryhmä 2003)

Jakeluverkkoyhtiöille tulee kustannuksia ja tulojen vähentymistä myrskytuhon sattuessa monista eri tekijöistä, kuten toimittamatta jäänyt energia, energian siirron tarpeen pieneneminen, korvausvelvollisuus, koneiden käyttö, puiden raivaus, palkat, linjan korjaus ja uuden rakentaminen tuhoutuneiden tilalle.

Toimittamatta jäänyt energia jää kuitenkin pienemmäksi kuin katkon ajalla normaalisti kulutettu energia, koska kylmälaitteet ja lämmityslaitteet vaativat tietyn energiamäärän, jotta haluttu lämpötila saadaan pidettyä. Pidemmän katkon aikana lämpötila muuttuu, ja jakelun palautumisen jälkeen laitteet käyvät täydellä teholla niin kauan kunnes asetusarvo saavutetaan.

Erityisesti voimakkaat ukkospuuskat uhkaavat myös siirtojännitteisiä linjoja. Pylvään kaatamiseen ei tuulen voima normaalioloissa riitä, mutta voimakas puuska voi sopivissa oloissa painaa vaihejohtimet yhteen. Johtimien koskettaessa toisiaan on seurauksena oikosulku. (Fingrid 2005b)

Tuulet aiheuttavat uhan merikaapeleille liikuttelemalla jäitä. Liikkuvat jäälautat muodostavat uhan erityisesti meren madaltuessa, jossa tuuli puristaa jäälauttoja muodostaen ahtojäätä. Ahtojää yltää merenpohjaan ja rasittaa siten merikaapelia.

Tuulilla on merkittävä jäähdyttävä vaikutus. Tuulet vaikuttavat muun muassa asuntojen lämmitystarpeeseen. Lämmitystarpeen lisääntyminen lisää energiasta ja siirrosta saatavia tuloja. Tuulilla on myös positiivinen vaikutus Suomen ja Ruotsin välisen yhdysjohdon siirtokapasiteettiin. Tuulet jäähdyttävät johtoa, jolloin sitä voidaan kuormittaa suu-remmalla teholla.

7.7 Esimerkki ilmastonmuutoksen vaikutuksista

Esimerkillä kuvataan ilmastonmuutoksen taloudellisia vaikutuksia sekä vaikutuksia huipputehoon. Mallina toimii kuvitteellinen Sisä-Suomessa oleva maaseutuverkon keskijännitelähti, jonka johtopituus on yhteensä 100 km. Kuormituksen on oletettu jakautuvan johdolle tasaisesti. Lähdön kustannuksista tarkastellaan raivauskustannusten sekä ilmastomuuttujien aiheuttamien vikojen kustannusten muutokset. Kustannuslaskenta on esitetty liitteessä B. Tarkasteluun on otettu huomioon ainoastaan ne ilmastomuuttujien aiheuttamat muutokset, joiden vaikutukset voidaan arvioida kustannuksina. Lähdön kuormituksen jakautuminen on esitetty taulukossa 15.

Taulukko 15. Keskijännitelähdön kulutuksen jakautuminen käyttäjäryhmittäin.

Käyttäjärühmä	Sähkön kulutus [MWh/a]	Keskiteho [kW]
Kotitalous	3 075	351
Maatalous	1 907	218
Palvelu	431	49
Teollisuus	308	35
Julkinen	246	28
Loma-asunnot	185	21
Yhteensä	6 152	702

Ilmastonmuutoksen aiheuttamat kustannusten muutokset on esitetty kahden skenaarion avulla. Skenaario 1 kuvaa muutoksia, jos ilmasto muuttuu pienimpien muutosennusteiden mukaisesti, ja vastaavasti skenaario 2 kuvaa kustannusten muutoksia perustuen suurimpiin muutosennusteisiin. Eri skenaarioissa vikojen laskennassa käytetyt kertoimet on esitetty taulukossa 16. Kertoimilla kuvataan ilmastomuuttujien muutosten vaikutuksia vikoihin eli ukkosen kohdalla skenaariossa 1 tämä tarkoittaa sitä, että ukkosen aiheuttamien vikojen ennustetaan lisääntyvän 20 %. Ukkosen aiheuttamien vikojen määrien kasvu perustuu molemmissa skenaarioissa kuvassa 21 esitettyyn arvioon ukkospäivien muutoksesta. Lumi- ja jääkuorman ja lumikuorman kaataman puun kertoimissa on huomioitu ennustetut muutokset sadannassa ja lämpötilassa. Sadannan muutosennusteet on esitetty luvussa 6.1, ja lämpötilan muutosennusteet on esitetty luvussa 6.2. Tuulen ja myrskyn arvot on saatu taulukoista 9 ja 10 alueen neljä kohdalta.

Taulukko 16. Eri skenaarioissa vikojen laskennassa käytetyt kertoimet.

Vian aiheuttaja	Skenaario 1	Skenaario 2
Ukkonen	1,2	1,6
Lumi- ja jääkuorma	0,75	1,1
Lumikuorman kaatama puu	1,1	1,3
Tuuli ja myrsky	0,77	1,44

Taulukossa 17 on esitetty keskeytyksiä koskevat tunnusluvut. Lukujen lähteenä on käytetty keskeytystilastoja 2000, koska vuonna 2000 asiakkaiden keskimääräinen häiriökeskeytysaika h/a on ollut 1990-luvun keskitasoa. Vuosia 2001–2003 ei huomioitu, koska tuolloin Suomessa koettiin sähköjakelussa laajoja vikoja, ja nämä viat näkyvät selvästi piikkeinä keskeytyksiä koskevissa tunnusluvuissa. Taulukossa esitettyjä lukuja α ja t on käytetty asiakkaiden keskeytyshaittojen laskennassa, ja lukua λ on käytetty vian korjauskustannusten laskennassa. Luvulla α kuvataan keskeytysten lukumäärää asiakkaalla vuodessa kpl/a, luvulla t kuvataan keskeytysaikaa asiakkaalla vuodessa h/a, ja luvulla λ kuvataan vikataajuutta kpl/100 km.

Taulukko 17. Keskeytyksiä koskevat tunnusluvut Sisä-Suomessa olevalla maaseutuverkolla (Keskeytystilasto 2000).

Vian aiheuttaja	α [kpl/a]	t [h/a]	λ [kpl/100 km]
Ukkonen	0,33	0,32	0,36
Lumi- ja jääkuorma	0,07	0,06	0,09
Lumikuorman kaatama puu	0,27	0,23	0,25
Tuuli ja myrsky	2,69	2,05	2,53

Taulukossa 18 on esitetty keskeytyksestä aiheutuvan haitan laskennassa käytetyt vika-keskeytysten rahalliset arvot käyttäjäryhmittäin. Ensimmäistä lukua käytetään laskettaessa jokaisesta keskeytyksestä aiheutunutta haittaa, ja toista lukua käytetään laskettaessa keskeytyksen pituudesta riippuvaa haittaa.

Taulukko 18. Vikakeskeytysten KAH-arvot käyttäjäryhmittäin.

Käyttäjärühmä	Vikakeskeytys	
	€/kW	€/kWh
Kotitalous	0,068	0,61
Maatalous	0,54	4,90
Teollisuus	2,60	8,70
Julkinen	0,65	3,40
Palvelu	1,90	11,0

Johdon 40 vuoden pitoajalta nykyhetkeen diskontattu keskeytyksestä aiheutunut haitta on laskettu yhtälöllä 1. Vika on oletettu yhtä todennäköiseksi minä ajanhetkenä tahansa, jolloin laskennassa on käytetty keskitehoa.

$$KAH = (\alpha \cdot P \cdot k_p + t \cdot P \cdot k_e) \cdot \kappa, \quad (1)$$

- missä α on keskeytysten lukumäärä asiakkaalla vuodessa [kpl/a]
 P on käyttäjäryhmän keskiteho [kW]
 k_p on keskeytyskustannuksen arvostus [€/a/kW,kpl]
 t on keskeytysaika asiakkaalla vuodessa [h/a]
 k_e on keskeytyskustannuksen arvostus [€/a/kWh]
 κ on diskonttauskerroin.

Vian korjauskustannuksena on käytetty 1 640 €/kpl. Vuosittainen vian korjauskustannus on saatu kertomalla vikakustannus lähdön vikojen määrällä.

Vakiokorvausten arvioinnin lähtökohtana oli, että vakiokorvauksia aiheuttavat tavallisesti voimakkaat myrskyt, joita esiintyy tietyllä lähdöllä harvoin. Vakiokorvausten laskennassa oletuksena oli, että nykytilanteessa lähdöllä koetaan 40 vuoden aikana yksi myrsky, joka on voimakkuudeltaan syksyllä 2001 koetun Janika-myrskyn kaltainen. Koska myrskyn esiintymistodennäköisyys on yhtä suuri jokaiselle vuodelle, oletettiin myrskyn osuvan lähdölle heti verkon rakentamisen jälkeen, jolloin kustannus vastaa suoraan nykyarvoa. Lähdön asiakkaista 37,5 % oletettiin kokevan 12–24 tunnin keskeytyksen, jolloin korvaus on 10 % vuosittaisesta verkkopalvelumaksusta ja 12,5 % asiakkaista oletettiin kokevan 24–72 tunnin keskeytyksen, jolloin korvaus on 25 % vuosittaisesta verkkopalvelumaksusta. Vakiokorvauksia saavien asiakkaiden prosentuaaliset määrät ovat samaa suuruusluokkaa kuin on esitetty selvitysmiehen raportissa Sähkön toimitusvarmuuden parantaminen. Skenaarioiden vakiokorvaussummat on saatu kertomalla nykyinen vakiokorvaussumma taulukossa 16 esitetyllä tuulen ja myrskyn kertomella. Näin saadut arvot ovat riittävän tarkkoja, kun otetaan huomioon laskentaan liittyvä epävarmuus. Esimerkkilaskelmassa ei huomioitu korvauksen 700 €:n ylärajaa.

Taulukossa 19 on esitetty laskennassa käytetyt käyttäjäryhmien sähkön siirron hinnat eli verkkopalvelumaksut. Hinnat ovat koko maan painotettuja keskihintoja 1.6.2005 ja ne sisältävät käyttäjän maksamat perus-, teho- ja energiamaksut. Oletuksena on, että kaikki ryhmän asiakkaat ovat tyyppikäyttäjän kaltaisia.

Taulukko 19. Sähkön siirron keskihinnat (Energiamarkkinavirasto 2005).

Käyttäjäryhmä	Siirron keskihinta [snt/kWh]
Kotitalous	3,23
Loma-asunnot	3,6
Maatalous	3,6
Teollisuus	2,99
Julkinen	5
Palvelu	5

Raivauskustannuksissa on otettu huomioon alustan raivaus sekä helikopteriraivauksen kustannukset. Helikopteriraivaus suoritetaan 16 vuoden välein ja alustan raivaus 7 vuoden välein. Raivauskustannuksiksi asetettiin helikopteriraivaukselle 1 000 €/km ja alustan raivaukselle 260 €/km. Molemmissa skenaarioissa ennustetaan raivauskustannusten kasvavan 10 %. Kasvuprosentin perusteena on arvio lämpötilan muutoksen vaikutuksesta puiden vuosikasvuun.

Taulukossa 20 on esitetty esimerkkilähdön raivaus- ja vikakustannukset sekä kustannusten muutokset. Kustannukset on diskontattu nykyhetkeen nykyarvomenetelmällä, jossa tarkasteluajaksi asetettiin 40 vuotta ja korkoprosentiksi viisi. Lähdön keskitehon on ajateltu pysyvän vakiona koko tarkasteluajan.

Taulukko 20. Verkon koko pitoajan raivaus- ja vikakustannukset sekä kustannusten muutokset nykyarvoina esimerkkilähdöllä.

Kustannus	Nykyiset	Skenaario 1	Muutos	Skenaario 2	Muutos
Raivaus [k€]	85	94	9	94	9
KAH [k€]	122	103	-19	175	53
Viankorjaus [k€]	91	77	-14	131	40
Vakiokorvaus [k€]	15	12	-3	22	7
Yhteensä [k€]	313	286	-27	422	109

Skenaarion 1 mukaan raivauskustannusten ja vikakustannusten summa pienenee ilmastomuutoksen myötä vajaan 10 % ja skenaarion 2 mukaan kustannukset tulevat kasvamaan noin 35 %. Vikakustannusten suuri ero skenaarioiden välillä johtuu erityisesti erosta tuulisuuden muutoksessa. Kustannuksissa ei ole otettu huomioon roudan vähenemisen vaikutusta tuulien aiheuttamiin vikoihin, jolloin skenaario 2 on varovaisen arvon mukaan lähempänä todellisia lukuja. Jos verkkoyhtiön kustannukset kasvavat skenaarion 2 mukaisesti, niin raivaus- ja vikakustannusten kasvuluku on vielä suhteellisen pieni, kun otetaan huomioon esimerkkilähdön investointikustannukset. Karkeasti laskettuna esimerkkilähdön johto maksaa noin 2 000 k€, muuntajat noin 330 k€, kun muuntajatiheys 1 kpl/km ja erottimet noin 270 k€, kun erotintiheys 1 kpl/km eli yhteensä noin 2 600 k€. Tällaisella investointikustannuksella ilmastomuutoksesta aiheutuvat lisäkustannukset ovat noin 4 % lähdön investointikustannuksista. Kuitenkin on otettava huomioon, että laskennassa on huomioitu ainoastaan ne kustannusten muutokset, joita voidaan suhteellisen luotettavasti arvottaa.

Taulukossa 21 on esitetty energian kulutuksen, verkkoliiketoiminnasta saatavien tulojen sekä huipputehon muutokset. Siirtotulojen laskennassa on käytetty taulukossa 19 esitetyjä siirron keskihintoja. Energiankulutus sekä huipputeho on määritetty tyyppikuormituskäyriä ja niiden lämpötilakorjauskertoimia hyväksikäyttäen. Energiankulutuksen

laskennassa on käytetty keskimääräisiä lämpötilan muutoksia ja huipputehojen määrityksessä on käytetty ääriämpötilojen muutoksia.

Taulukko 21. Energian kulutuksen, verkkoliiketoiminnasta saatavien vuositulojen sekä huipputehon muutos esimerkkilähdöllä.

	Nykyinen	Skenaario 1	Muutos	Skenaario	Muutos
Energian kulutus [MWh]	6137	6039	-98	5954	-183
Siirtotulot [k€]	217	214	-3	211	-6
Huipputeho [MW]	2,21	2,12	-0,09	2,07	-0,14

Ilmaston lämpenemisen myötä energiankulutus pääsääntöisesti pienenee ja tämä pienentää verkkotoiminnasta saatavia tuloja nykyisillä tariffeilla. Skenaarion 1 mukaan siirtotulot pienenevät esimerkkilähdöllä noin 1,5 % ja skenaarion 2 mukaan noin 3 %. Huipputeho puolestaan laski skenaarion 1 mukaan noin 4 % ja skenaarion 2 mukaan noin 6 %.

Esimerkkilähdöllä raivaus- ja vikakustannukset kasvavat skenaarion 2 mukaan yhteensä noin 109 k€, joista vikakustannusten osuus on noin 100 k€. Jotta vikojen määrät saataisiin pysymään nykyisellään, pitää verkkoa kehittää vikavarmemmaksi. Maakaapeilla saadaan vikojen määrää vähennettyä huomattavasti, mutta vastaan tulevat pelkästään jo maakaapeliverkon korkeat investointikustannukset. Jo kolme kilometriä esimerkkilähdölle tarvittavaa maakaapelia maksaa noin 120 k€. Ratkaisuksi tulee siten valita jokin muu vikojen vähentämiskeino.

Tulojen vähentyminen eli tässä tapauksessa siirtotulojen vähentyminen on liiketoiminnan kannalta aina negatiivista. Ilmastonmuutoksen vaikutusta saadaan kuitenkin pienennettyä esimerkiksi muuttamalla tariffeja.

Huipputeho on yleensä määräävä tekijä verkostokomponenttien mitoituksessa. Esimerkkilähdön 6 %:n huipputehon lasku jää kuitenkin niin pieneksi, ettei sillä ole tässä tapauksessa merkitystä komponenttien mitoitukseen.

8. Ilmastonmuutoksen merkitys

8.1 Verkostosuunnittelu

Verkostosuunnittelun kannalta ilmastomuuttujien aiheuttamien vikojen määrien kasvu on merkittävin ilmastonmuutoksen aiheuttama vaikutus. Huolellisella verkostosuunnittelulla voidaan ilmastomuuttujien aiheuttamien vikojen määriä vähentää, mutta vikavarman verkon rakentaminen ei ole kuitenkaan nykytekniikalla mahdollista. Vikamäärien kasvuun varautuminen näkyy verkostosuunnittelussa verkon investointikustannuksien kasvuna. Korkeista investointikustannuksista johtuen ilmasto-muuttujien aiheuttamiin vikoihin ei voi varautua kerralla, vaan verkoston kehittäminen etenee periaatteessa hitaasti. Tosin nyt lähestytään tilannetta, jossa iso osa keskijänniteverkkoa on tulossa saneerausikään. Suuri osa saneeraukseen tulevasta verkosta on rakennettu maaseudun sähköistämisen aikaan, jolloin johdot vedettiin metsien läpi ajatuksena vain mahdollisimman nopea maaseudun sähköistäminen. Nämä johdot ovat erittäin haavoittuvaisia tykkylumesta tai voimakkaista tuulista, ja ongelmia vielä lisää vaikea pääsy vikapaikalle. Saneerauksen yhteydessä näitä verkkoja on hyvä kehittää entistä vikavaremmiksi vastaamaan nyky-yhteiskunnan asettamia tarpeita ja vaatimuksia.

Nykyiset sähköverkot suunnitellaan ja rakennetaan tämänhetkisten rakennusnormien mukaisesti. Tällä hetkellä käytössä olevilla ilmastomalleilla ei voi selvittää mahdollisesti ajanjaksolla 2016–2045 esiintyviä voimakkaita sääilmiöitä, joten tämän työn perusteella ei voi sanoa, tulisiko verkstorakenteissa ottaa huomioon huomattavasti nykyistä suuremmat ilmastolliset rasitteet, joita mahdolliset ääri-ilmiöt voisivat aiheuttaa.

Verkostosuunnittelussa vikojen määrien kasvun lisäksi ilmastomuuttujien muutosten yksi merkittävä vaikutus on verkostokomponenttien mahdollinen pitoajan lyhentyminen. Esimerkiksi sademäärien kasvu lisää monin paikoin lahovauriota ja lämpötilan nousu rasittaa muuntajia ja kaapeliverkkoja kesäaikaan. Tämän tutkimuksen puitteissa on kuitenkin mahdoton sanoa, kuinka suuri vaikutus tulee lopulta olemaan. Mahdollinen verkostokomponenttien käyttöiän lyhentyminen nostaisi ennen kaikkea investointikustannuksia pitkällä aikavälillä.

Lämpötilan nousun seurauksena sähkönkulutus ja huippukuormat muuttuvat. Liitteessä A on esitetty sähkönkulutuksen ja huippukuormien muutokset käyttäjäryhmittäin. Ilmastonmuutoksen aiheuttamien huippukuormien muutokset vaikuttavat verkoston mitoitukseen voimakkaasti lämpötilariippuvaisilla sähkönkuluttajilla eli sähkölämmityskohteissa ja kohteissa, joissa tarvitaan huomattavaa jäähdytystehoja.

Ilmaston muuttuessa Etelä- ja Keski-Suomen ilmasto-olosuhteet lähestyvät tietyiltä osin Etelä-Ruotsin nykyistä ilmasto, jolloin verkkoyhtiöiden kokemuksia voisi jakaa keske-

nään. Suomen ja Ruotsin sähköverkoissa on eroja, mutta niistä löytyy myös yhtäläisyyksiä. Ruotsalaisen verkon myrskylle altein verkko-osuus on, vastaavalla tavalla kuin Suomessa, maaseudulla oleva kj-verkko. Tämän verkon pituus on Ruotsissa noin 50 000 – 60 000 km. Pääasialliset vianaiheuttajat ovat talvella voimakkaat tuulet ja lumimyrskyt sekä kesällä ukkonen. Vikamääriä pyritään vähentämään vastaavilla teknisillä ratkaisuilla kuin Suomessa. käyttämällä päällystettyjä avojohtoja tai maakaapelia sekä lisäämällä raivausta. Monissa kohteissa raivausta on lisätty lyhentämällä raivauksen intervalli kahdeksasta vuodesta neljään vuoteen. (IVA 2004)

8.2 Verkoston rakentaminen

Verkoston rakentamisessa ilmastomuuttujien muutoksilla on suurin vaikutus rakentamisen vaikeutumiseen nykyisellä kalustolla. Nykyisin käytössä olevien koneiden käyttö vaikeutuu, koska routaantuminen vähenee ja maa pehmenee sateiden vaikutuksesta. Ilmastomuutoksen myötä rakentamiseen käytettäviltä koneilta vaaditaan entistä enemmän kykyä liikkua pehmeässä maastossa. Tarpeen tullen on hankittava joko uusia koneita tai lisättävä käytössä olevien koneiden kantokykyä esimerkiksi leventämällä pyöräpinta-alaa. Uusien koneiden hankinta tai käytössä olevien kehittäminen nostaa verkon käyttökustannuksia.

Roudan väheneminen voisi mahdollistaa nykyistä matalampien kaapelioiden käytön, jolloin kaapeliojan kaivamiskustannukset olisivat huomattavasti nykyistä pienemmät. Routaantumisen vähentyminen mahdollistaa myös kaapelioiden kaivamisen nykyistä pidemmän aikaa, eteläisessä Suomessa lähes vuoden ympäri.

8.3 Verkoston kunnossapito

Jakeluverkkojen kunnossapidon kannalta merkittävin ilmastomuutoksen aiheuttama vaikutus on kunnossapitotarpeen kasvu. Luvun 7.7 esimerkissä esitettiin ainoastaan raivauskustannusten muutokset, koska muiden kunnossapitotoimintojen muutosten arviointi rahallisesti on erittäin vaikeaa. On kuitenkin selvää, että esimerkiksi lahon aiheuttamat vauriot lisääntyvät, jos ilmasto kehittyy ennusteiden mukaisesti. Vaurioiden lisääntyessä kasvaa kunnossapidon tarve ja siten kunnossapitokustannukset.

Esimerkkilähdön viankorjauskustannukset kasvoivat skenaarion 2 mukaan vajaan 45 %. Esitetyt kustannusten muutokset ovat suuntaa antavia lukuja avojohtoverkoille. Maakaapeliosuuksien kasvaessa vähenevät ilmastomuuttujien aiheuttamat vikakustannukset, ja kaapeliverkoissa ilmastollisten vikojen määrä on hyvin pieni. Ilmastomuutoksesta

aiheutuvien kunnossapitokustannuksien muutokset ovat siten kaapeliverkoissa paljon avojohtoverkkoja pienemmät.

Kantaverkon kunnossapidon kannalta vaikein ilmastomuuttujien aiheuttama muutos on maan kantokyvyn heikentyminen sadannan kasvaessa ja roudan vähentyessä, koska verkoston kunnossapidossa käytettyjen koneiden liikkuminen vaikeutuu maan kantokyvyn heikentyessä. Raivaustarve ja siten myös raivauskustannukset kasvavat myös kantaverkossa arvion mukaan noin 10 %.

8.4 Verkkoliiketoiminnan tulot

Ilmastomuuttujien muutokset tulevat vaikuttamaan negatiivisesti käyttö-, keskeytys- ja kunnossapitokustannuksiin sekä energian siirrosta saataviin tuloihin ja siten lopulta verkkoliiketoiminnan kannattavuuteen.

Käyttökustannuksia nostaa uuden kaluston tai entisen kaluston kehittämisen tarve. Kustannusten suuruus riippuu voimakkaasti nykyisestä kalustosta. Parhaassa tapauksessa nykyinen kalusto on tulossa uusinnan kohteeksi, jolloin kalusto saadaan ilman suuria lisäkustannuksia vastaamaan uusia vaatimuksia. Pahimmillaan vastahankittu kalusto ei riitä vastaamaan uusia ilmastollisia vaatimuksia, jolloin kaluston kehittäminen lisää kustannuksia.

Ennusteiden mukaan ilmastomuuttujien aiheuttamien vikojen määrät kasvavat, jos verkkoja ei kehitetä vastaamaan uusia ilmastollisia olosuhteita. Ilmastomuutos lisää siten voimakkaasti vikakustannuksia nykyisissä verkoissa, ja verkkojen kehittäminen vastaamaan uusia ilmastollisia vaatimuksia puolestaan nostaa selvästi investointikustannuksia. Mahdollinen verkostokomponenttien eliniän lyhentymisen nostaa myös investointikustannuksia pitkällä aikavälillä.

Verkostokomponenttien kasvava kulumisen ja vikaantuminen nostavat kunnossapitotarvetta ja siten kunnossapitokustannuksia. Luvun 7.7 esimerkkilähdön vikakustannukset kasvoivat pahimman skenaarion mukaan noin 43 % ja kunnossapitokustannukset raivauskustannusten osalta noin 10 %. Luvut ovat suuntaa antavia ja laskettu avojohtoverkolle. Maakaapeliverkoissa ilmastomuutoksen vaikutus jää ennusteiden mukaan paljon pienemmäksi.

Verkkoliiketoiminnasta saatavat tulot pienenevät lämmitystarpeen vähentyessä nykyisillä tariffeilla, mutta toisaalta on otettava huomioon, että kesän lämpötilojen nousu lisää jäähdytystarpeen kasvua ja näin kompensoi kulutusta. Nykyinen valvontamalli antaa myös mahdollisuuden hintojen nostoon, koska valvontamallissa sallitaan tietty tuotto.

Toisaalta myös sähkönkulutus kasvaa joka vuosi, mikä pienentää tai jopa kumoaa kokonaan ilmastonmuutoksen vaikutuksen. Sähkönkulutuksen luontaisen kasvun vaikutus riippuu voimakkaasti lähtöä kuormittavasta käyttäjäryhmästä, ja lämpötilan nousu vaikuttaa siten selkeimmin sähkölämmitys kohteissa. Sähkölämmityksen osuus on noin 10 % sähkön kokonaiskulutuksesta.

9. Yhteenveto

Ilmastomallien antamien ennusteiden mukaan maapallon ilmasto on muuttumassa voimakkaasti tämän vuosisadan aikana. Ilmastomuutos näkyy selvästi myös Suomessa jo seuraavan 40 vuoden aikana.

Ennusteiden mukaan sadanta lisääntyy sekä kesällä että talvella kuuden tunnin maksimiarvoilla sekä keskiarvoilla mitattuina. Sadannan kasvun seurauksena lumikuormien aiheuttamat viat lisääntyvät, ja linjojen rakentamiseen ja kunnossapitoon käytettävien koneiden käyttö vaikeutuu maan kantokyvyn heikentyessä. Maakaapeleiden, pylväiden, harusten, johtokatu- ja kytkinlaitteiden kunnossapidon tarve kasvaa.

Lämpötila nousee sekä kesällä että talvella niin minimi-, maksimi- kuin keskiarvoilla mitattuina. Lämpötilan nousu kasvattaa johtimien ja muuntajien virtalämpöhäviöitä ja vähentää erityisesti sähkölämmityksen energiantarvetta, jolloin energian siirtotoiminnasta saatavat tulot vähentyvät. Toisaalta kesän lämpötilojen nousu lisää jäähdytystarpeen kasvua ja näin kompensoi kulutusta. Paikallisesti kasvavat kesäiset huippukuormat lyhentävät huippukuormalla kuormitettavien muuntajien pitoaikoja. Ilmastomuutoksen vaikutusta energian tarpeen vähentymisessä pienentää kulutuksen jatkuva vuosittainen kasvu. Lisäksi nykyinen valvontamalli sallii tarvittaessa hintojen noston, koska nykyinen valvontamalli sallii tietyn tuoton. Lämpötilan nousun seurauksena kasvukausi pitenee, ja nopeakasvuisten lehtipuiden vuosittainen kasvu lisääntyy 10 %. Tämä merkitsee karkeasti arvioituna linjojen raivauskustannusten 10 %:n kasvua.

Kuuran ja huurteen määrä vähenee Vaara-Suomen rinteitä lukuun ottamatta, jossa kuuran ja huurteen määrä voi jopa kasvaa. Huurteen määrän vähentyminen pienentää siirtajännitteisten johtojen koronahäviöitä sekä vähentää kanta- ja jakeluverkon kunnossapidon tarvetta ja vikojen määriä.

Ilmastomalleilla ei voi suoraan ennustaa ukkosmääriä tulevaisuudessa. Ukkosmäärien muutosten arviointi perustuu ennustettuun lämpötilan muutokseen. Arvion perusteella ukkosen esiintyminen tulee lisääntymään, ja samalla salaman aiheuttamista ylijännitteistä johtuvat viat lisääntyvät. Salamet aiheuttavat selkeästi eniten jakelumuuntajavaurioita ja voivat vaurioittaa kaapeliverkkoja. Ylijännitteistä seuraa oiko- ja maasulkuja, joista seuraa sähkökäyttäjille ikäviä jännitekuoppia. Ukkoseen kuuluu usein voimakkaat tuulenpuuskat, jotka voivat tuhota jakelulinjoja hyvin laajastikin kaatamalla puita linjojen päälle.

Routaantumisen vähentymisen seurauksena sähköverkon kunnossapito sekä rakentaminen vaikeutuvat, koska sula maa ei kannata painavia koneita. Routa antaa merkittävän suojan puille tuulta vastaan, jolloin roudan puuttuessa puut kaatuvat tuulen vaikutukses-

ta huomattavasti helpommin jakelulinjoille aiheuttaen keskeytyksiä. Roudan vähentyminen mahdollistaa kaapeloinnin talvella Etelä-Suomessa, myös roudan aiheuttamat rasiitukset pienenevät.

Tuulisuuden ennustamisessa mallit antoivat toisistaan eroavat ennusteet toisen mallin ennustaessa tuulien määrien kasvua ja toisen tuulien määrien vähentymistä. Kuitenkin roudan vähentyminen sekä ukkosen lisääntyminen puoltavat arvioita, että tuulen aiheuttamat viat tulevat lisääntymään. Tuulet aiheuttavat merkittävää vahinkoa erityisesti jakeluverkkojen avojohdoille kaatamalla puita linjojen päälle. Voimakkaissa ja laajalaisissa puuskarintamissa sähkökatkot voivat koskettaa hyvinkin suurta asiakaskuntaa, ja viat voivat olla paikoin pitkäkestoisia.

Ilmastonmuutoksen myötä on odotettavissa, että ilmastomuuttujien aiheuttamat rasiitukset verkkoliiketoimintaa kohtaan tulevat olemaan niistä saatuja hyötyjä suuremmat. Vikamäärien kasvu on merkittävin ja haastavin ilmastonmuutoksen aiheuttama haitta. Merkittävimmät vikojen aiheuttajat tulevat olemaan ennusteiden mukaan myös tulevaisuudessa ukkonen, lumikuormat ja tuuli. Vikojen ja kunnossapitotarpeen kasvu merkitsee kulujen kasvua, ja kun ilmastonmuutos vielä pienentää tuloja vähentämällä sähkönkulutusta, merkitsee ilmastonmuutos kokonaisuutena verkkoliiketoiminnan kannattavuuden heikentymistä, jos ilmasto kehittyy ennusteiden mukaisesti.

Lähdeluettelo

Achberger, C., Linderson, M.-L. & Chen, D. 2003. Performance of the Rossby Centre regional atmospheric model in Southern Sweden: comparison of simulated and observed precipitation. *Theoretical and Applied Climatology*, 76, s. 219–234. Viitattu 31.3.2005. Saatavissa: <http://www.gvc.gu.se/ngeo/deliang/ca03.pdf>.

Adato 2003. Adato Energia Oy. Tilastoverkosto. Viitattu 14.3.2005. Saatavissa: <http://www.energia.fi>

Ala-Outinen, T., Harmaajärvi, I., Kivikoski, H., Kouhia, I., Makkonen, L., Saarelainen, M., Tuhola, M. & Törnqvist, J. 2004. Ilmastonmuutoksen vaikutukset rakennettuun ympäristöön. Espoo: VTT Tiedotteita 2227. 83 s. ISBN 951-38-6461-8.

Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K. & Palva, V. 2003. Suurjännitetekniikka. 2. painos. Helsinki. Oy. Yliopistokustannus/ Otatiето. 520 s. ISBN 951-672-320-9.

Auvinen, O. 1997. Käyttöhäiriöt 110 kV voimajohdoilla. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Elovaara, J. & Laiho, Y. 2001. Sähkölaitostekniikan perusteet. 4. painos. Helsinki. Oy Yliopistokustannus/Otatiето. 487 s. ISBN 951-672-285-7.

Energiauutiset 2/2005. Kansalaisten tietämys ilmastonmuutoksesta tutkittiin.

Energiamarkkinavirasto. 2005. Sähkön hintatilastot. Viitattu 5.8.2005. Saatavissa: <http://www.energiamarkkinavirasto.fi>

Energiasanommat 2/2002. Senerin ilmajohtotyöryhmän kuulumisia. Viitattu 27.6.2005. Saatavissa: <http://www.energia.fi>

Fingrid 2005a. Yritys, kantaverkko. Saatavissa: <http://www.fingrid.fi>

Fingrid. 2005b. Auvinen, O. & Martikainen, A. VTT. Jyrinsalo, J. & Laine, R. Fingrid Oyj. Palaveri. Helsinki. 30.5.2005.

Finlex 2005. Valtion säädöstietopankki 27 f § 6.6.2003/444. Viitattu 12.4.2005. Saatavissa: <http://www.finlex.fi>.

Fortum 2005. Auvinen, O. & Martikainen, A. VTT. Huhtala, O. & Vierimaa, P. Fortum sähkönsiirto Oy. Palaveri. Paimio. 17.6.2005.

Heiskanen, J. 2005. Metsäntutkimuslaitos. Sähköpostihaastattelu. 14.6.2005.

Ilmatieteen laitos. 1991. Tilastoja Suomen ilmastosta 1961–1990. Ilmatieteen laitos. Helsinki. 125 s. ISBN 951-697-355-8. ISSN 0076-6755.

Ilmatieteen laitos. 2005a. Tutkimus, ilmasto ja sen muutos. Saatavissa: <http://www.fmi.fi>

Ilmatieteen laitos. 2005b. Sää ja ilmasto, ilmastotilastot. Saatavissa: <http://www.fmi.fi>

Ilmatieteen laitos. 2005c. Tutkimus, millainen ilmakehä on. Saatavissa: <http://www.fmi.fi>

Ilmatieteen laitos. 2005d. Kysymyksiä ja vastauksia. Saatavissa: <http://www.fmi.fi>

IPCC. 2001. Kolmas arviointiraportti. The Scientific Basis. Intergovernmental Panel on climate change. Saatavissa: <http://www.ipcc.ch>

IVA. 2004. Lövgren, K. Landsbygdens eldistribution. Kungliga Ingenjörsvetenskapsakademien.

Järventausta, P., Mäkinen, A., Trygg, P., Kivikko, K., Antila, S., Partanen, J. Lassila, J., Viljainen, S., Honkapuro, S., Tahvanainen, K., Kässi, T., Bergman, J.-P., Laaksonen, P. & Soininen, M. 2004. Sähköverkkoliiketoiminnan tulevaisuuden näkymiä – haasteita ja mahdollisuuksia v. 2010. Tampereen teknillinen yliopisto. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Lappeenranta.

Kellomäki, S. 2005. Metsätieteellinen tiedekunta. Joensuun yliopisto. Puhelinhaastattelu. 11.7.2005.

Keskeytystilasto 2000. Sähköenergialiitto ry SENER, Helsinki. ISSN 0782-6966.

Keskeytystilasto 2002. Sähköenergialiitto ry SENER, Helsinki. ISSN 0782-6966.

Kumpulainen, L., Hautala, J. & Kauhaniemi, K. 2002. Teollisuuden jännitekuoppien lieventämismahdollisuuksia suojausteknisin keinoin. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). Vaasa. Tesla-raportti 63/2002. 34 s.

- Kuusinen, K. 2005. Verkkokeskuksen päällikkö. Fingrid Oyj. Sähköpostihaastattelu. 16.3.2005.
- Kuusisto, E. & Käyhkö, J. 2004. Globaalimuutos. 1. painos. Helsinki, Otava. 169 s. ISBN 951-1-18924-7.
- Lahti, K., Lahtinen, M. & Nousiainen, K. 1996. Transmission Line Corona Losses under Hoar Frost Conditions. Tampereen teknillinen yliopisto.
- Lakervi, E. 1996. Sähkönjakeluverkkojen suunnittelu. 1. painos. Helsinki. Otatiето Oy. 10 s. ISBN 951-672-220-2.
- Metsäntutkimuslaitos. 2004. Metsien terveys. Viitattu 1.7.2005. Saatavissa: <http://www.metla.fi>
- Metsätuhotyöryhmä. 2003. Työryhmämuistio MMM 2003:11. Helsinki. 2003. 32 s. ISBN 952-453-122-4. ISSN 0781-6723.
- Merentutkimuslaitos. 2004. Itämeriportaali. Viitattu 15.6.2005. Saatavissa: <http://www.fimr.fi>
- Partanen, J. 1997. Sähköenergiatekniikan perusteet. Opetusmoniste EN C-88. Lappeenranta. LTY. ISBN 951-764-021-8. ISSN 0785-8248.
- Partanen, J., Lassila, J., Viljainen, S., Honkapuro, S. & Tahvanainen, K. 2004. Sähkömarkkinat opetusmoniste. Lappeenranta. LTY. 76 s. ISBN 951-819-9, ISSN 1459-3114.
- Ruokolainen, L. 2005. Kasvihuoneilmion voimistumisesta johtuvan ilmastonmuutoksen vaikutus sään ääri-ilmiöihin Suomessa. Pro-gradu-tutkielma. Helsinki. Helsingin yliopisto. 74 s.
- 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 twenty-first century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. *Climate dynamics*, Vol. 22 (1), s. 13–31. Springer-Verlag. ISSN 0930- 7575.
- Räisänen, J. 2005a. Miten ilmasto muuttuu kasvihuoneilmion voimistuessa, ja kuinka paljon me siitä tiedämme? Esitelmä Fysiikan päivien SMFL-seminaarissa 9.3.2005.
- Räisänen, J. 2005b. Ilmakehätieteiden osasto, Fysikaalisten tieteiden laitos, Helsingin yliopisto. Sähköpostihaastattelu. 16.6.2005.

Savolainen, I., Ohlström, M. & Kärkkäinen, A. 2003. Ilmasto haaste teknologialle. Helsinki. 208 s. ISBN 951-37-3883-3.

Tietoyhteys 1/2005. Muutoksen mallit. Viitattu 1.4.2005.
Saatavissa: http://www.csc.fi/lehdet/tietoyhteys/TY1_2005.pdf

Tuomi, T. 2005. Tutkimuspäällikkö. Ilmatieteen laitos. Sähköpostihaastattelu. 20.4.2005.

VTT 2005. Auvinen, O., Rantanen, Y., Jalonen, M., Farin, J., Hänninen, S. & Martikainen, A. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Palaveri. Espoo 25.5.2005.

Liite A: Sähkönkulutuksen ja huipputehon muutokset käyttäjäryhmittäin

Taulukko 1. Sähkönkulutuksen ja huipputehon muutokset käyttäjäryhmittäin. Sähkönkulutuksen muutokset perustuvat keskilämpötilojen muutoksiin ja huipputehon muutokset perustuvat ääriämpötilojen muutoksiin. Pienin muutos on laskettu pienimmillä ennustetuilla lämpötilojen muutoksilla ja suurin muutos on laskettu suurimmilla ennustetuilla lämpötilojen muutoksilla. Lämpötilojen muutosennusteet on esitetty luvussa 6.2.

Käyttäjryhmä	Energiankulutuksen muutos [%]		Huipputehon muutos [%]	
	pienin	suurin	pienin	suurin
1-vuoroteollisuus	-0,3	-0,6	-1,2	-1,8
2-vuoroteollisuus	-0,3	-0,6	-1,2	-1,8
Muu teollisuus yhdistetty	-0,3	-0,6	-1,2	-1,8
Julkiset palvelut	-0,1	-0,2	-0,4	-0,7
Yksityiset palvelut	0,1	0,3	0,0	0,4
Palvelu yhdistetty	0,0	0,0	0,0	0,0
Omakoti- ja rivitaloasuminen	-0,5	-1,0	-2,0	-2,9
Maataloudet	-1,7	-3,2	-4,4	-6,6
Kerrostaloasuminen	-0,3	-0,5	-1,6	-2,4
Kotitaloudet yhdistetty	-0,5	-1,0	-2,0	-2,9
Huonekohtainen sähkölämmitys ja asuminen	-3,0	-5,8	-5,2	-7,8
Osittain varaava sähkölämmitys ja asuminen	-1,3	-2,4	-3,2	-4,7
Varaava sähkölämmitys ja asuminen	-0,5	-1,0	-1,6	-2,4
Sähkölämmitys ja asuminen, yhdistetty	-2,7	-5,0	-5,2	-7,8
Huonekohtainen sähkölämmitys	-3,1	-5,8	-5,2	-7,8
Osittain varaava sähkölämmitys	-1,3	-2,4	-3,2	-4,7
Varaava sähkölämmitys	-0,6	-1,0	-1,6	-2,4
Sähkölämmitys yhdistetty	-2,8	-5,0	-5,6	-8,3
Omakotitalo, huonekohtainen sähkölämmitys, käyttövesi < 300 l	-4,0	-7,3	-6,9	-10,3
Omakotitalo, huonekohtainen sähkölämmitys, käyttövesi 300 l	-3,9	-7,1	-6,9	-10,3
Omakotitalo, huonekohtainen sähkölämmitys, lattialämmitys 2 kW	-3,7	-6,9	-6,5	-9,7
Omakotitalo, osittain varaava sähkölämmitys, pitkät sulkuajat	-1,4	-2,6	-2,8	-4,2
Omakotitalo, varaava sähkölämmitys	-0,8	-1,7	-0,8	-1,3
Omakotitalo, lämpöpumppulämmitys	-4,0	-7,2	-7,2	-10,7
Omakotitalo, kaksoislämmitys, 1-aikatariffi	-3,4	-6,1	-6,8	-10,1
Omakotitalo, kaksoislämmitys, 2-aikatariffi	-2,9	-5,3	-6,2	-9,3
Omakotitalo, kaksoislämmitys, vuodenaikatariffi	-2,9	-5,6	-6,0	-8,9
Omakotitalo, ei sähkölämmitystä, ei sähkö- kiuasta	-1,2	-2,2	-4,6	-6,8

Omakotitalo, ei sähkölämmitystä, sähkökiuas	-1,0	-1,7	-3,4	-5,1
Maatalous, karja- ja maitotalous, asuminen mukana	-3,4	-6,2	-6,7	-10,0
Maatalous, karja- ja maitotalous, asuminen, sähkökiuas	-1,1	-1,8	-4,1	-6,1
Maatalous, karja- ja maitotalous, asuminen, sähkölämmitys, kiuas	-3,3	-5,7	-7,4	-11,0
Maatalous, lihantuotanto, asuminen mukana	-4,2	-7,4	-8,0	-12,0
Maatalous, kasvituotanto, asuminen mukana	-2,7	-4,9	-6,2	-9,2
Kerrostalo, ei asuntojen osuutta	-0,7	-1,3	-1,8	-2,7
Kerrostalo kiinteistö, asunnot mukana	-0,5	-1,1	-0,9	-1,4
Rivitalo, koko kiinteistö, huonekohtainen sähkölämmitys	-2,4	-4,3	-4,9	-7,3
Loma-asuntoalue, muuntopiiri	-3,2	-5,8	-6,5	-9,7
1-vuoroteollisuus, tekstiili	-0,9	-1,9	-1,9	-2,8
1-vuoroteollisuus, puutavara	-0,7	-1,5	-1,2	-1,7
1-vuoroteollisuus, paperi	-0,6	-1,3	-1,8	-2,8
1-vuoroteollisuus, kemia	-0,6	-1,1	-1,8	-2,6
1-vuoroteollisuus, metalli	-1,0	-2,1	-2,6	-3,9
2-vuoroteollisuus, elintarvike	0,2	0,5	0,0	2,4
2-vuoroteollisuus, kemia	-0,5	-1,1	-1,6	-2,3
2-vuoroteollisuus, metalli	0,0	0,1	0,0	0,6
Yleis- ja muu hallinto	-0,3	-0,6	-0,1	-0,1
Opetus- ja koulutustoimi	-0,6	-1,5	0,0	0,0
Sairaalat ja terveydenhuolto	-0,3	-0,8	0,0	0,0
Tukkukauppa	0,1	0,1	0,0	0,0
Tavaratalot ja marketit	0,5	1,2	0,0	2,4
Muu vähittäiskauppa	-0,2	-0,4	-0,1	-0,2
Automyynti ja huoltamatoiminta	-0,5	-1,1	-1,0	-1,4
Hotelli- ja majoitustoiminta	-1,5	-2,8	-4,1	-6,1
Ravintola- ja kahvilatoiminta	0,2	0,6	0,0	2,2
Rahalaitos- ja vakuutustoiminta	0,4	0,8	0,0	2,1
Virkistys- ja kulttuuripalvelut	-1,0	-1,9	-2,2	

Liite B: Laskentaesimerkki luvussa 7.7 esitettyyn esimerkkiin ilmastonmuutoksen vaikutuksista

Laskentaesimerkki luvussa 7.7 esitettyyn esimerkkiin ilmastonmuutoksen vaikutuksista. Laskennassa esitetään raivauskustannuksien, ukkosesta aiheutuvien viankorjauskustannusten ja kotitalouskäyttäjryhmän KAH-arvojen sekä vakiokorvaussumman laskenta nykyhetkellä ja skenaariolla 2.

Lasketaan johdon raivauskustannukset.

Maaseutuverkosta oletetaan olevan 50 % metsässä, jolloin esimerkissä olevalla 100 km pitkällä johdolla on raivattava johtopituus 50 km.

Ensimmäisen vuoden raivauskustannukset lasketaan yhtälöllä 1.

$$K_{R0} = \frac{K_H \cdot l_R}{T_H} + \frac{K_A \cdot l_R}{T_A}, \quad (1)$$

missä K_H = helikopteriraivauskustannukset [€/km]

l_R = raivattava johtopituus [km,a]

T_H = helikopteriraivauksen intervalli [a]

K_A = alustan raivauskustannus [€/km]

T_A = alustan raivausintervalli [a]

Sijoitetaan yhtälöön 2 luvussa 7.7 esitetyt raivauskustannuksia koskevat luvut.

$$K_{R0} = \frac{1000 \text{ €/km} \cdot 50 \text{ km,a}}{16 \text{ a}} + \frac{260 \text{ €/km} \cdot 50 \text{ km,a}}{7 \text{ a}} = 4,9 \text{ k€}$$

Kustannuksien nykyarvojen määrittämisessä käytettävä diskonttauskerroin κ lasketaan yhtälöllä 2.

$$\kappa = \frac{1 - (1 + i)^{-n}}{i}, \quad (2)$$

missä i = korkoprosentti [%]

n = pitoaika [a]

Johdon 40 vuoden pitoajalta nykyhetkeen diskontattu raivauskustannus.

$$K_R = K_{R0} \cdot \kappa = 4982 \text{ €} \cdot \frac{1 - (1 + 0,05)^{-40}}{0,05} = 85 \text{ k€}$$

Puiden vuosittaisen pituuskasvun ennustetaan kasvavan 10 %, jolloin vuosittaisten raivauskustannusten arvioidaan kasvavan 10 %. Skenaariossa 2 johdon raivauskustannukseksi tulee tällöin noin 94 k€.

Lasketaan verkon 40 vuoden pitoajalta nykyhetkeen diskontattu KAH-arvo kotitalouksille nykyisillä ukkosmäärillä. Kaava ja merkinnät on esitetty luvussa 7.7.

$$KAH = (\alpha \cdot P \cdot k_p + t \cdot P \cdot k_e) \cdot \kappa = (0,33 \frac{\text{kpl}}{\text{a}} \cdot 351 \text{ kW} \cdot 0,068 \frac{\text{€}, \text{a}}{\text{kW}, \text{kpl}} + 0,32 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 351 \text{ kW} \cdot 0,61 \frac{\text{€}, \text{a}}{\text{kWh}}) \cdot \frac{1 - (1 + 0,05)^{-40}}{0,05} = 1,3 \text{ k€}$$

Vastaavalla tavalla lasketaan jokaisen vian aiheuttama KAH kaikille käyttäjäryhmille. Saadut tulokset summataan, jolloin saadaan koko lähdölle 40 vuoden pitoajalta nykyhetkeen diskontattu KAH-arvo.

Skenaariossa 2 ukkosesta aiheutuvien vikojen määrän ennustetaan kasvavan 60 %, jolloin skenaariossa 2 ukkosesta aiheutuva kotitalouksien KAH-arvo on 40 vuoden pitoajalle noin 2,1 k€.

Lasketaan 40 vuoden pitoajalta nykyhetkeen diskontattu ukkosesta aiheutuvien vikojen korjauskustannukset nykyisillä ukkosmäärillä.

$$K_v = (1640 \frac{\text{€}}{\text{kpl}} \cdot \lambda_{\text{Ukkonen}} \cdot l) \cdot \kappa = (1640 \frac{\text{€}}{\text{kpl}} \cdot 0,0036 \frac{\text{kpl}}{\text{km}} \cdot 100 \text{ km}) \cdot 17,1590 = 10 \text{ k€}$$

Skenaariossa 2 ukkosesta aiheutuvien vikojen määrän ennustetaan kasvavan 60 %, jolloin skenaariossa 2 ukkosesta aiheutuvien vikojen korjauskustannukset ovat noin 16 k€. Vastaavalla tavalla saadaan laskettua jokaisen vian aiheuttama korjauskustannus.

Vakiokorvaukset lasketaan yhtälöllä 3.

$$K_{vk} = a \cdot E \cdot K_{vp} \cdot 0,1 + b \cdot E \cdot K_{vp} \cdot 0,25, \quad (3)$$

missä a = käyttäjäryhmän prosentuaalinen osuus, joka kokee yli 12 h, mutta alle 24 h keskeytyksen [%]

E = käyttäjäryhmän keskimääräinen energiankulutus vuodessa [kWh]

K_{vp} = käyttäjäryhmän verkkopalvelumaksu [€/kWh]

b = käyttäjäryhmän prosentuaalinen osuus, joka kokee yli 24 h, mutta alle 72 h keskeytyksen [%]

Kotitalouksille hyvittävät vakiokorvaukset lasketaan sijoittamalla yhtälöön 4 kotitalouksia koskevat luvut.

$$K_{\text{vk}} = 0,375 \cdot 3,075 \cdot 10^6 \text{ kWh} \cdot 0,0323 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 0,1 + 0,125 \cdot 3,075 \cdot 10^6 \text{ kWh} \cdot 0,0323 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 0,25 = 6,8 \text{ k€}$$

Skenaarion 2 mukaan tuulen aiheuttamat viat lisääntyvät 44 %, jolloin skenaariossa 2 kotitalouksille hyvittävät vakiokorvaukset ovat noin 9,8 k€.

Vastaavalla tavalla saadaan laskettua jokaiselle käyttäjäryhmälle hyvittävät vakiokorvaukset.

Tekijä(t) Martikainen, Antti			
Nimeke Ilmastomuutoksen vaikutus sähköverkkoliiketoimintaan			
Tiivistelmä Ilmasto asettaa tiettyjä vaatimuksia sähköverkkoliiketoiminnalle. Sähköverkko joutuu kohtaamaan jatkuvas- ti ilmastollisia rasituksia ja se onkin suunniteltu ja rakennettu kestäväksi normaaliin rasitukseen. Nyt suunnitel- tu ja rakennettu verkko voi olla toiminnassa seuraavat 40 vuotta. Jos ilmaston aiheuttamat rasitukset muut- tavat tänä aikana, voi sillä olla merkittäviä vaikutuksia sähköverkkoliiketoiminnalle. Selvittämällä ilmas- tonmuutoksen vaikutuksia etukäteen voidaan vaikutuksiin varautua, ja näin ilmastonmuutoksen kielteisiä vaikutuksia kyetään mahdollisuuksien mukaan pienentämään ja myönteisiä asioita hyödyntämään. Tässä työssä tutkittiin ilmastonmuutoksen vaikutuksia sähköverkkoliiketoimintaan. Ilmastomuutosennus- teet laadittiin RCAO-ilmastomallin antamien laskelmien perusteella. Ilmastomuuttujien ennusteet tehtiin ajanjaksolle 2016–2045 ja ennusteiden vertailujaksona käytettiin ajanjaksoa 1960–1990. Ennusteet laadittiin sadannalle, lämpötilalle, kuuraantumiselle, hurerteelle, ukkoselle, routaantumiselle ja tuulisuudelle. Ilmas- tomuuttujien vaikutukset arvioitiin sekä tekniseltä että taloudelliselta kannalta. Ilmastomallien antamien ennusteiden mukaan maapallon ilmasto tulee muuttumaan voimakkaasti tämän vuosisadan aikana, ja ilmastomallien mukaan ilmastonmuutos tulee näkymään selvästi myös Suomessa ja seuraavan 40 vuoden aikana. Ilmastomuutoksen myötä on odotettavissa, että ilmastomuuttujien aiheutta- mat rasitukset verkkoliiketoimintaa kohtaan tulevat olemaan niistä saatuja hyötyjä suuremmat. Vikamäärien kasvu on merkittävin ja haastavin ilmastonmuutoksen aiheuttama haitta. Ukkonen, lumikuormat ja tuuli tulevat aiheuttamaan nykyistä enemmän vikoja erityisesti keskijänniteverkoissa avojohdoille, ellei verkkoja kehitetä vikavarmemmiksi. Lämpötilan nousun seurauksena lämmitystarve laskee ja jäähdystarve nousee. Tämä näkyy merkittävimmin voimakkaasti lämpötilariippuvaisten käyttäjäryhmien sähkönkulutuksessa ja huippukuormissa.			
Avainsanat electricity network business, climate change, extreme events			
ISBN 951-38-6789-7 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)			
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)			Projektinumero
Julkaisu-aika Huhtikuu 2006	Kieli Suomi, engl. abstr.	Sivuja 74 s. + liitt. 5 s.	Hinta
Projektin nimi Ilmaston vaikutus sähköverkkoliiketoimintaan		Toimeksiantaja(t) Tekes, SYKE, VTT, yritykset	
Yhteystiedot VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. vaihde 020 722 111 Faksi 020 722 7026		Myynti VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4404 Faksi 020 722 4374	

Published by



Series title, number and
report code of publication

VTT Research Notes 2338
VTT-TIED-2338

Author(s) Martikainen, Antti			
Title Impacts of climate change on electricity network business			
Abstract <p>Climate has a significant impact on the electricity network business. The electricity network is under the weather pressure all the time and it is planned and constructed to withstand normal climatic stresses. The electricity network that has been planned and constructed now, is expected to be in operation next 40 years. If climatic stresses change in this period, it can cause significant impacts on electricity network business. If the impacts of climate change are figured out in advance, it is possible to mitigate negative points of climate change and exploit the positive points.</p> <p>In this paper the impact of climate change on electricity network business is presented. The results are based on RCAO climate model scenarios. The climate predictions were composed to the period 2016–2045. The period 1960–1990 was used as a control period. The climate predictions were composed for precipitation, temperature, hoarfrost, thunder, ground frost and wind. The impacts of the change of the climate variables on electricity network business were estimated from technical and economical points of view. The estimation was based on the change predictions of the climate variables.</p> <p>It is expected that climate change will cause more damages than benefits on the electricity network business. The increase of the number of network faults will be the most significant and demanding disadvantage caused by climate change. If networks are not improved to be more resistant for faults, then thunder, heavy snow and wind cause more damages especially to overhead lines in medium voltage network. Increasing precipitation and decreasing amount of ground frost weaken the strength of soil. The construction work will be more difficult with the present vehicles because wet and unfrozen ground can not carry heavy vehicles. As a consequence of increasing temperature, the demand of heating energy will decrease and the demand of cooling energy will increase. This is significant for the electricity consumption and the peak load of temperature-dependent electricity users.</p>			
Keywords electricity network business, climate change, extreme events			
ISBN 951-38-6789-7 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)			
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)			Project number
Date April 2006	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 74 p. + app. 5 p.	Price
Name of project Impacts of climate change on electricity network business		Commissioned by Tekes, SYKE, VTT Technical Research Centre of Finland, companies	
Contact VTT Technical Research Centre of Finland P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 111 Fax +358 20 722 7026		Sold by VTT Technical Research Centre of Finland P.O.Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4404 Fax +358 20 722 4374	

VTT Tiedotteita – Research Notes

- 2317 Ajanko, Sirke, Moilanen, Antero & Juvonen, Juhani. Jätteiden syntypaikkalajittelujärjestelmän ja käsittelytekniikan vaikutus kierrätys polttoaineen laatuun. 2005. 83 s. + liitt. 21 s.
- 2318 Hostikka, Simo, Mikkola, Esko, Rinne, Tuomo, Tillander, Kati & Weckman, Henry. Henkilöturvallisuuden kehittäminen maanalaisissa tiloissa paloriskejä pienentämällä. 2005. 143 s. + liitt. 9 s.
- 2319 Weckman, Henry. Henkilöturvallisuuden kehittäminen maanalaisissa tiloissa paloriskejä pienentämällä. Tehtävä B: Poistumisturvallisuus. 2005. 93 s. + liitt. 13 s.
- 2320 Pöyhönen, Ilpo. Lääkintälaitteiden ohjelmistot. Suunnittelun kehityskohteita vesiputous- ja XP-mallin näkökulmasta. 2006. 61 s. + liitt. 2 s.
- 2321 Tsupari, Eemeli, Monni, Suvi & Pipatti, Riitta. Non-CO₂ greenhouse gas emissions from boilers and industrial processes. Evaluation and update of emission factors for the Finnish national greenhouse gas inventory. 2005. 82 p. + app. 24 p.
- 2322 Kutinlahti, Pirjo, Lähteenmäki-Smith, Kaisa & Konttinen, Jari. Vaikuttavaa tutkimusta. Arviointikäytäntöjä julkisissa tutkimusorganisaatioissa: Helia ja SAMK. 2006. 131 s. + liitt. 6 s.
- 2323 Arnold, Mona, Kuusisto, Sari, Wellman, Kari, Kajolinna, Tuula, Räsänen, Jaakko, Sipilä, Jorma, Puumala, Maarit, Sorvala, Sanna, Pietarila, Harri & Puputti, Katja. Hajuhaitan vähentäminen maatalouden suurissa eläintuotantoyksiköissä. 2006. 74 s. + liitt. 12 s.
- 2324 Kivisaari, Sirkku & Saranummi, Niilo. Terveystieteiden systemiset innovaatiot vuorovaikutteisen kehittämisen kohteena. Case Pro Viisikko. 2006. 77 s. + liitt. 4 s.
- 2325 Häkkinen, Tarja, Rauhala, Kari & Huovila, Pekka. Rakennetun ympäristön kestävä kehityksen kriteerit ja indikaattorit. 2006. 89 s. + liitt. 29 s.
- 2327 Security-tutkimuksen roadmap. Mika Naumanen & Veikko Rouhiainen (toim.). 2006. 69 s.
- 2329 Heimonen, Ismo & Hemmilä, Kari. Tuloilmaikkunan energiatehokkuus. 2006. 65 s. + liitt. 41 s.
- 2330 Apilo, Tiina & Taskinen, Tapani. Innovaatioiden johtaminen. 2006. 112 s. + liitt. 10 s.
- 2331 Niskanen, Antti. Työkalu luotettavuuden mallipohjaiseen analysointiin. 2006. 58 s.
- 2332 Kutinlahti, Pirjo, Lähteenmäki-Smith, Kaisa & Konttinen, Jari. Vaikuttavaa tutkimusta. Arviointikäytäntöjä julkisissa tutkimusorganisaatioissa: Helia ja SAMK. 2006. 131 s. + liitt. 6 s.
- 2335 SHOPS – Smart Home Payment Services. Towards the liberalisation of Europe's utilities industry. 2006. 35 p.
- 2336 Lähteenmäki-Smith, Kaisa, Hyytinen, Kirsi, Kutinlahti, Pirjo & Konttinen, Jari. Research with an impact. Evaluation practises in public research organisations. 2006. 79 p.
- 2338 Martikainen, Antti. Ilmastonmuutoksen vaikutus sähköverkkoliiketoimintaan. 2006. 74 s. + liitt. 5 s.

Tätä julkaisua myy	Denna publikation säljs av	This publication is available from
VTT PL 1000 02044 VTT Puh. 020 722 4404 Faksi 020 722 4374	VTT PB 1000 02044 VTT Tel. 020 722 4404 Fax 020 722 4374	VTT P.O. Box 1000 FI-02044 VTT, Finland Phone internat. + 358 20 722 4404 Fax + 358 20 722 4374