



ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

RAPORTEJA
RAPPORTER
REPORTS
2016:3

LAAJA-ALAISIA METSÄPALOJA MAHDOLLISTAVAT SÄÄTILANTEET SUOMEN ILMASTOSSA

**ARI VENÄLÄINEN
ILARI LEHTONEN
ANTTI MÄKELÄ**



RAPORTTEJA

REPORTS

No. 2016:3

551.509.326

551.577.32

551.577.38

551.577.62

551.583.15

**LAAJA-ALAISIA METSÄPALOJA
MAHDOLLISTAVAT SÄÄTILANTEET
SUOMEN ILMASTOSSA**

Ari Venäläinen

Ilari Lehtonen

Antti Mäkelä

Ilmatieteen laitos

Meteorologiska institutet

Finnish Meteorological Institute

Helsinki 2016

ISBN 978-951-697-885-0
ISBN 978-951-697-884-3 (pdf)
ISSN 0782-6079

Erweko
Helsinki 2016



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

Julkaisuaika 2016

Tekijät Ari Venäläinen, Ilari Lehtonen, Antti Mäkelä

Projektin nimi

Suurpalojen mahdollisuus Suomessa

Nimeke: Laaja-alaisia metsäpaloja mahdollistavat säätilanteet Suomen ilmastossa

Tiivistelmä

Laaja-alaisen metsäpalojen edellytyksenä ovat kuiva maasto sekä palojen leviämisen otolliset sääolot: voimakas tuuli, korkea lämpötila sekä alhainen ilmankosteus. Sääolot vaihtelevat vuodesta toiseen, ja aika ajoin myös Suomen ilmastossa kuivuus kasvattaa metsäpaloaaraa ja tekee myös laaja-alaiset metsäpalot mahdollisiksi. Tuorein esimerkki Suomen ilmastoa vastaavissa oloissa tapahtuneesta suurpalosta oli Keski-Ruotsissa Västmanlandissa 2014 tapahtunut noin 14 000 ha laajuinen palo. Huolimatta hyvästä ennakkovaroitus- ja sammutusjärjestelmästä emme voi varmuudella sanoa, ettei vastaava suurpalo voisi tapahtua myös Suomessa. Ilmaston vaihteluihin ja muutoksiin sopeutuminen edellyttää varautumista sään ääri-ilmiöihin. Suurten metsäpalojen esiintymiselle erityisen otollisten säätilanteiden esiintymistodennäköisyyksiä Suomessa ei ole aiemmin systemaattisesti kartoitettu, ja tämän tutkimuksen tavoitteena on täyttää tuo puute.

Suurten metsäpalojen esiintymisvaaraa selvitettiin arvioimalla paloille erityisen otollisten säätilanteiden esiintymistodennäköisyyksiä (toistuvuusajoja) Suomessa käytössä olevien metsäpaloindeksin (FFI) ja latvapaloindeksin sekä ns. kanadalaisen metsäpaloaaraa kuvaavan indeksin (FWI) avulla. Lisäksi selvitettiin salamoinnin ja palojen välistä yhteyttä. Ilmastonmuutoksen vaikutusta suurpalojen mahdollisuuteen arvioitiin ilmastokenaarioiden avulla tulevien vuosikymmenten ilmastostamme saataviin arvioihin perustuen. FWI:n arvot laskettiin ns. uusanalyysien pohjalta. FFI:n ja latvapaloindeksin toistuvuusajat analysoitiin neljälle havaintoasemalle (Vantaa, Jokioinen, Jyväskylä sekä Sodankylä) pohjautuen näillä paikoilla tehtyihin säähavaintoihin. Menneiden vuosikymmenien aikana sattuneiden suurten (yli 200 ha) metsäpalojen aikana vallinneen sään erityispiirteet selvitettiin läheisten sääasemien havaintojen pohjalta.

Suomen ilmastossa esiintyy noin kerran kymmenessä vuodessa säätilanne, jolloin suuressa osassa maata maasto on erittäin kuiva pitkään jatkuneen sateettoman jakson jälkeen ja samanaikaisesti latvapaloindeksi, kuten myös FWI, kohoavat korkealle voimakkaan tuulen, korkean ilman lämpötilan ja alhaisen ilman kosteuden seurauksena ja olosuhteet suurpalojen esiintymiselle ovat erittäin otolliset. Vastaavia olosuhteita esiintyy tyypillisesti Etelä-Euroopassa vuosittain. Yksittäisiä päiviä, jolloin palojen leviäminen suurpaloksi jollakin pienemmällä alueella on mahdollista, on Etelä-Suomessa lähes vuosittain, pohjoisempaan harvemmin.

Ukkosten aiheuttamien metsä- ja maastopalojen lukumäärät korreloivat selvästi salamamäärien kanssa. Tämä tarkoittaa sitä, että voimakkaalla ukkosella, joka tuottaa runsaasti salamoita, on suurempi todennäköisyys synnyttää palo. Salamoiden ja siihen liittyvän sateen havaintojen pohjalta voitaisiin kehittää reaaliaikainen varoitusjärjestelmä salaman syyttämien palojen tehokkaampaan ennustamiseen.

Suurpaloihin liittyy suuria taloudellisia menetyksiä, ja niinpä 10 000 ha suuruusluokkaa olevan palon arvioidut kustannukset olisivat useita kymmeniä miljoonia euroja. Suurten taloudellisten ja muiden menetysten riski korostaa palojen ennaltaehkäisyn merkitystä; Suomen ilmasto ei suojaa maamme suurpaloilta, ja palojen ennaltaehkäisyyn ja sammuttamiseen liittyvien riskianalyysien tuleekin olla ajan tasalla.

Julkaisijayksikkö: Ilmastokeskus

Luokitus (UDK)

Asiasanat

551.509.326, 551.577.32, 551.577.38, 551.577.62

Metsäpalot, kuivuus, salamat, ilmasto, ilmaston

551.583.15

muutos

ISSN ja avainnimeke 0782-6079 Raportteja

ISBN 978-951-697-885-0

Kieli suomi

ISBN 978-951-697-884-3 (pdf)

Sivumäärä 30



Published by	Finnish Meteorological Institute Erik Palménin aukio 1, P.O. Box 503 FIN-00101 Helsinki, Finland	Series title, number and report code of publication	Reports 2016:3
		Date	2016
Authors	Ari Venäläinen, Ilari Lehtonen, Antti Mäkelä	Name of project	Probability of large forest fires in Finland
Title: The occurrence of weather conditions favouring widespread forest fires in Finland			
Abstract			
<p>Prerequisite for extensive forest fires is the dry terrain. As well, the spread of fires requires favourable weather conditions: strong winds, high temperatures and low air humidity. The Finnish forest fire season is typically quite short, extending from May to September. The weather conditions vary from year to year, and even in the Finnish climate drought occasionally increases the risk of large-scale forest fires. The most recent example of a widespread forest fire that occurred in conditions comparable to the Finnish climate was the fire in Västmanland in central Sweden in 2014. The burned area was approximately 14 000 ha. In spite of a good early warning and fire-extinguishing system, we cannot definitely say that a major fire could never take place in Finland. Climate change may require new measures to adapt to extreme weather conditions. The probability of weather conditions favouring the occurrence of devastating forest fires has earlier not been mapped in Finland, and the objective of this study is to fill that gap.</p> <p>In this study, we have applied forest fire indexes (FWI, FFI and crown-fire index) to estimate the return periods of the most extreme and severest risk conditions. As input data, we used meteorological observations from four locations (Vantaa, Jokioinen, Jyväskylä and Sodankylä) for the period 1971–2014. As well, we used ERA-Interim and ERA-20C reanalysis data. The impact of climate change on the probability of large-scale fires was estimated on the basis of climate model simulations. The weather conditions associated with the large (over 200 ha) fires that occurred during the previous decades were studied using weather observations from nearby stations. In addition, the impact of lightning on the fire risk was assessed.</p> <p>According to our analyses, approximately once in ten years, widespread drought occurs in Finland accompanied with high temperatures, low air humidity and high wind speed. These conditions lead to high fire risk index values, which are typical in southern Europe and Mediterranean countries. Individual days when the spread of fires into conflagrations is possible over some smaller area exist in southern Finland almost every year, but more rarely in the north. During the upcoming decades, the probability of these kinds of weather conditions to occur will become higher due to the ongoing climate change.</p> <p>The occurrence of thunderstorm-related forest fires correlates with the amount of lightning that the thunderstorms produce. This means that a more intense thunderstorm (measured with the number of lightning flashes) has more potential to ignite a fire than a weaker one. Because lightning and convective precipitation can nowadays be observed in real time with lightning location system and weather radars, it would be possible to develop a real-time warning system for predicting forest fires ignited by lightning.</p> <p>Widespread forest fires can cause severe economical damage. According to earlier estimates, the economic costs related to a fire of a scale of 10 000 ha would be several tens of million euros. Finnish climate does not prevent large-scale fires from occurring; this emphasizes the importance of fire surveillance and prevention activities, and it is essential to keep the risk analyses related to prevention and extinguishing of fires updated.</p>			
Publishing unit:	Climate Service Center		
Classification (UDK)	551.509.326, 551.577.32, 551.577.38, 551.577.62 551.583.15	Keywords	forest fires, drought, lightning, climate, climate change
ISSN and series title	0982-6079-Report		
ISBN 978-951-697-885-0	ISBN 978-951-697-884-3 (pdf)		
		Language	Finnish
	Pages	30	
	Note		

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	6
2. AINEISTO JA MENETELMÄT	8
2.1 <u>Metsäpalovaaran arviointiin käytettävät säämuuttajat</u>	8
2.2 <u>Toistuvuusajkojen arviointi</u>	9
2.3 <u>Sää- ja ilmastotiedot: havainnot, uusanalyysit ja ilmastoskenaariot</u>	10
2.4 <u>Suurpalojen yhteiskunnallisen sekä taloudellisen merkityksen arviointi</u>	11
3. TULOKSET	11
3.1 <u>Korkean metsäpalovaaran toistuvuustasot Pohjoismaissa</u>	11
3.2 <u>Asemakohtaiset toistuvuusajkatarkastelut: FFI, latvapaloindeksi sekä kuivuusjaksojen pituus</u>	15
3.3 <u>Suurpalotilanteiden aikana vallinneitten olosuhteiden tarkastelu</u>	18
3.4 <u>Salamat suurpalojen aiheuttajina</u>	20
3.5 <u>Ilmastomuutoksen vaikutus suurpalojen esiintymiseen</u>	24
3.6 <u>Suurpalojen taloudellinen ja yhteiskunnallinen merkitys</u>	25
4. JOHTOPÄÄTÖKSET	26
KIITOKSET	27
Kirjallisuusluettelo	27

1. JOHDANTO

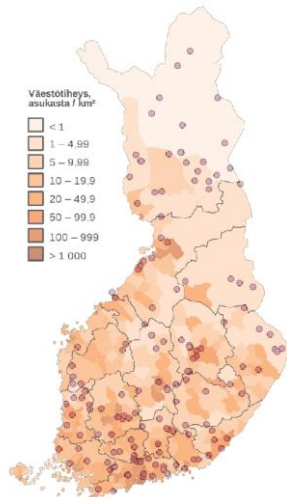
Ruotsissa, Norjassa ja Venäjällä on viime vuosina ollut laajoja ja merkittäviä vahinkoja aiheuttaneita maasto- ja metsäpaloja. Kuivien kesien suuret metsäpalot Venäjän puolella ovat tuntuneet ajoittain myös Suomessa ilman laadun huonontumisena; savu haisee ja näkyvyys heikkenee. Savu on myös mahdollisesti lisännyt vanhemman väestön kuolleisuusriskiä (Anttila ym., 2008). Tuorein esimerkki Suomen ilmastoa vastaavissa oloissa tapahtuneesta suurpalosta oli Keski-Ruotsissa Västmanlandissa vuonna 2014 tapahtunut noin 14 000 ha laajuinen palo (Länsstyrelsen, 2015). Huolimatta hyvästä ennakkovaroituksesta ja sammutusjärjestelmästä emme voi varmuudella sanoa, ettei vastaavanlaisia suurpaloja voisi esiintyä myös Suomessa.

Terminä ”suurpalo” ei ole yksiselitteisesti määritetty. Englanninkielinen termi ”conflagration” on määritetty laaja-alaiseksi, voimakkaaksi ja paljon tuhoa aiheuttavaksi paloksi. Suomessa viime vuosikymmeninä esiintyneet metsäpalot ovat tyypillisesti olleet pinta-alaltaan pieniä, ja koko maan keskimääräinen vuosittainen paloala on jäänyt noin 500 hehtaariin (Pelastustoimi, 2015). Suurpaloksi voitaisiinkin määrittää esimerkiksi palo, jonka pinta-ala on suurempi kuin keskimääräinen koko vuoden paloala. Toisaalta jo pienempialainenkin palo, joka etenee hallitsemattomasti, voi aiheuttaa suurta tuhoa esimerkiksi rakennuksia tai vaikkapa sähkö- ja tietoliikenne rakenteita tuhotessaan. Suurpalolla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa metsä- tai maastopaloa, jolla laaja-alaisuutensa tai intensiteettinsä johdosta on merkittäviä taloudellisia tai muuten ihmisten hyvinvointiin vaikuttavia seurauksia.

Ilmastossamme sää vaihtelee vuodesta toiseen, ja metsäpalojen esiintyminen seuraa tätä vuodesta toiseen tapahtuvaa vaihtelua (Mäkelä ym., 2012; Venäläinen ym., 2014). Suomen oloissa suurehkoja, yli 10 ha paloja on Pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilasto-tietokannan (PRONTO) mukaan ollut jaksolla 1996–2014 noin 160 kappaletta. Nämä palot sijoittuvat varsin tasaisesti eri puolille Suomea, ja esimerkiksi väestön tiheydellä ei näyttäisi olevan suurta merkitystä siihen, missä paloja on ollut (kuva 1). Tämä viittaa siihen, että suurpalojen esiintymiselle sääolojen vaikutus on erityisen tärkeä.

Ilmaston muutoksen myötä, lämpötilojen kohotessa ja metsäpalo kauden pidentyessä, metsäpalo vaaran arvioidaan kasvavan myös Suomessa (Kilpeläinen ym., 2010; Mäkelä ym., 2014; Lehtonen ym., 2014). Muutoksella voi olla vaikutusta myös suurpalojen esiintymisedellytyksiin (Lehtonen ym., 2016).

Metsäpalojen kannalta erityisen vaarallinen säätyyppi on pitkä kuiva jakso, jonka jälkeen tai aikana esiintyy ukkosia ja salamointia ilman merkittävää sadetta. Vaikka suurin osa salamonnista osuu ukkospilven rankkasadealueen yhteyteen, osa salamoista iskee myös hyvin sattumanvaraisesti sadealueen ulkopuolelle kuivaan maastoon (Tuomi ja Mäkelä, 2009). Lisäksi nopeasti liikkuvien ukkospilvien sade ei välttämättä ehdi kastella alustaa ja puita riittävästi, jolloin metsä- tai maastopalon syttymisen todennäköisyys kasvaa. Ukkosten ja salamoiden määrä vaihtelee kesästä toiseen, ja siten myös salamoiden syyttämien metsäpalojen määrä vaihtelee niin alueellisesti kuin ajallisestikin. Suomessa



Kuva 1. Väestötiheys sekä yli 10 ha metsäpalot vuosina 1996–2014 (Lähde: <http://www.kunnat.net/fi/tietopankit/tilastot/aluejaot/kuntien-pinta-alat-ja-asukastiheydet/Sivut/default.aspx>).

tehtyjen alustavien tutkimusten perusteella (Larjavaara ym., 2005) salaman sytyttämän metsäpalon todennäköisyys riippuu etenkin ukkosen tuottamien salamoiden lukumäärästä eli ukkosen voimakkuudesta, kun taas esimerkiksi salamoiden tyypillä tai muilla ominaisuuksilla (positiivinen vs. negatiivinen, osaiskujen lukumäärä) ei ole huomattu olevan merkitystä. Helteinen kesä 1972 on esimerkki erittäin hankalasta säätyypistä; helteinen ja kuiva säätyyppi yhdistettynä runsaaseen, ja kyseisenä vuonna suorastaan ennätyselliseen salamointiin (Laitinen, 1973). Myös kesällä 2014 olosuhteet olivat otolliset metsäpaloille, sillä heinäkuussa esiintyi huomattavan pitkä hellejakso, ja salamamäärä oli tuolloin noin puolitoistakertainen tavanomaiseen verrattuna; nämä yhdessä johtivat suureen salamoiden sytyttämien metsäpalojen määrään.

Metsien syttymisherkkyyttä arvioidaan tarkoitukseen kehitettyjen indeksien avulla (van Wagner, 1987; Vajda ym., 2014). Indeksien laskennassa lähtötietoina käytetään säätiöitä, jotka kuvaavat maaston kuivumisnopeutta ja toisaalta maan kosteutta lisäävää sademäärää. Indeksejä laskettaessa yhdistyvät palovaaran kannalta oleelliset säätekijät yhdeksi lukuarvoksi, ja niinpä indeksien vaihtelua kuvaavat tilastolliset tunnusluvut kuvaavat varsin kattavasti myös metsien syttymisherkkyyttä.

Arvioitaessa erityisen voimakkaan ilmiön esiintymistodennäköisyyttä puhutaan ilmiön toistuvuusajasta. Toistuvuusajaka-analyysien tekoon on kehitetty laskentamenetelmiä, joiden avulla voidaan havaintoajaka-sarjojen pohjalta arvioida hyvin harvinaisten ilmiöiden esiintymistodennäköisyyksiä (esim. Coles, 2001). Suomen ilmastoa kuvaavia eri ilmiöitten toistuvuusajakalaskemia ovat julkaisseet aiemmin esimerkiksi Uppala (1978), Venäläinen ym. (2007) ja Saku ym. (2011).

Metsäpalojen taloudelliset vaikutukset muodostuvat tuhoutuneen tai vaurioituneen metsän laskeneesta arvosta sekä muista ekosysteemipalveluiden menetyksistä, terveysvaikutuksista sekä sammutuskustannuksista (Kosenius ym., 2014). Metsäpalot toki kuuluvat metsien luontaiseen elinkiertoon, ja niinpä paloilla voidaan katsoa olevan myös metsien monimuotoisuuden kannalta hyödyllisiä vaikutuksia. Taloudelliset ja yhteiskunnalliset vaikutukset riippuvatkin jossain määrin siitä, miltä kantilta palojen vaikutusta katsotaan. Metsän omistaja voi kokea selviä taloudellisia menetyksiä, ja myös sammutuskustannukset ovat menoerä, mutta metsien luontoarvojen paraneminen voidaan katsoa palojen aikaansaamaksi positiiviseksi seikaksi.

Metsien ominaisuudet vaikuttavat syttymis- ja paloherkkyyteen (Lindberg ym., 2011). Jos metsien jatkuva kasvatus yleistyy metsätaloudessa, se voi muuttaa metsien rakennetta siten, että latvapalojen mahdollisuus kasvaa (Lindberg ym., 2011).

Tässä tutkimuksessa keskitytään selvittämään, kuinka usein suurpaloille otollisia sääolosuhteita Suomessa esiintyy. Kiinnostuksen kohteina ovat erityisen palovaarallisten sääolosuhteiden toistuvuusajat sekä niiden alueellinen ja ajallinen vaihtelu, ja lisäksi ilmastonmuutoksen vaikutus suurten palojen syttymistä suosivien sääolosuhteiden esiintymiseen. Maaston ja kasvillisuuden vaikutusta suurpalojen mahdollisuuteen ei tässä tutkimuksessa käsitellä, vaan tulokset kuvaavat tilannetta, jossa palavan aineksen määrä metsässä ei rajoita palon syttymistä ja leviämistä.

2. AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1 Metsäpalovaaran arviointiin käytettävät säämuuttajat

Metsien syttymisherkkyiden arviointiin on kehitetty indeksilukuja, joissa yhdistyvät kuivumiseen vaikuttavat säatekijät sekä sateen maastoa kostuttava vaikutus. Suomessa käytössä oleva metsäpalovaaraa kuvaava laskentamenetelmä kehitettiin v. 1995, ja se pohjautuu Lammin Evolla tehtyihin maanpinnan kosteusmittauksiin ja samanaikaisesti säähavaintoihin. Järjestelmässä arvioidaan 6 cm paksuisen pinnanläheisen humuskerroksen kosteutta, jota lasketaan säätietojen avulla määritetyn haihdunnan ja sademäärän avulla. Lähtötietoina haihdunnan laskennassa käytetään säähavaintoasemilla tehtyjä säähavaintoja ja numeerisista ilmakehämalleista saatuja säteilytaseen arvoja. Sademäärä saadaan säätutkamittauksista sekä pohjoisimman Suomen alueelta sääasemilla tehtävistä mittauksista. Laskenta tehdään 10 km × 10 km ja 1 km × 1 km hilaruudukoissa, joihin säähavainnot aluksi interpoloidaan. Indeksien arvon ennustettu muutos tulevien kahden vuorokauden aikana lasketaan meteorologin tarkastamien ja muokkaamien numeeristen sääennustemalliajajojen avulla (Vajda ym., 2014). Indeksien arvo vaihtelee välillä 1...6. Metsäpalovaroitusta annetaan, kun indeksi saavuttaa arvon 4, joka vastaa kosteuden tilavuusosuutta 20 % maaperässä. Laskenta aloitetaan keväällä lumen sulettua. Lähtötilanteessa maaston kosteudelle annetaan arvoksi 50 %.

Tietyissä olosuhteissa palo voi herkästi levitä ns. latvapaloksi. Tällaiset olosuhteet vallitsevat kun maasto on hyvin kuiva, ilma lämmintä ja kuivaa ja tuulee voimakkaasti. Mahdollisten latvapalotilanteiden ennakoimiseksi Ilmatieteen laitoksella (Ilmatieteen laitos, Sää- ja turvallisuuskeskus) on käytössä ns. latvapaloindeksi. Metsäpaloindeksin (FFI) ollessa 4 tai suurempi lasketaan latvapaloindeksi yhtälöllä (1) tuulen nopeuden (W , $m s^{-1}$), ilman suhteellisen kosteuden (rh , %) sekä ilman lämpötilan (T , °C) avulla.

$$Latva = FFI + (-0.0046 * W^2 + 0.2391 * W) + (-0.01966 * rh + 1.1794) + (0.0006 * T^2 + 0.0057 * T - 0.2) \quad (1)$$

Jos latvapaloindeksin arvo 6 tai korkeampi, tiedotetaan pelastusviranomaisille latvapalovaarasta.

Tässä hankkeessa FFI:n ja latvapaloindeksin arvot laskettiin neljälle paikkakunnalle (Vantaa, Jokioinen, Jyväskylä ja Sodankylä) pohjautuen jakson 1971–2014 mitattuihin säätietoihin. Jyväskylän havaintoaseman tuulimittauksissa on vuosikymmenien aikana tapahtunut muutoksia, joiden seurauksena latvapaloindeksin arvot eivät ole koko

tarkasteltavalla ajanjaksolla vertailukelpoisia. Tämän johdosta Jyväskylän alueen latvapaloindeksin pitkän aikavälin vaihtelua ei tutkimuksessa tarkasteltu. Laskenta tehtiin kolmen tunnin välein ns. synoptisille ajanhetkille. Sademäärien tuntiarvot ovat tulleet saataville sääasemien automatisoinnin seurauksena vasta viimeisten runsaan 10 vuoden aikana. Vanhemmissa havainnoissa sademäärä mitattiin kaksi kertaa vuorokaudessa. Sillä tuleeko sademäärä yhden vai useamman havainnon aikana on hieman vaikutusta indeksin arvoon. Tämän vuoksi havainnoista saatava vuorokauden sademäärä jaettiin tasan kolmelle kolmen tunnin välein olevalle havaintojaksolle. Haihdunnan laskennassa tarvittavat kokonaissäteilyn arvot saatiin havaintotiedoista, ja arvio pitkäaaltoisen säteilyn taseelle (RLn) laskettiin (Thompson ym., 1981; Sellers, 1965; Venäläinen, A., 1986) ilman lämpötilan (T, Kelvineinä) ja vesihöyryn osapaineen (e, hPa) avulla yhtälöllä (2).

$$RLn = 0.8 * Em * StefB * T^4 * (1.28 * \left(\frac{e}{T}\right)^{\frac{1}{7}} - 1) \quad (2)$$

missä Em on emissiokerroin 0.98 ja StefB on Stefan-Boltzmanin-vakio ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

Useissa eri maissa käytetään ns. kanadalaista metsäpaloindeksiä (FWI), jossa maaston syttymisherkkyttä arvioidaan puolenpäivän aikaan mitatun ilman lämpötilan, ilman suhteellisen kosteuden ja tuulen nopeuden sekä edellisen vuorokauden sadekertymän avulla. Järjestelmässä arvioidaan myös mahdollisen palon intensiteettiä. Vajdan ym. (2014) mukaan FFI ja FWI vastaavat Suomen oloissa toisiaan likimain taulukon 1 mukaisesti.

Taulukko 1. Kanadalaisen (FWI) ja Suomessa käytettävän metsäpaloindeksin (FFI) arvojen vastaavuuden arviointi (Vajda ym., 2014).

	FWI	FFI
Maasto erittäin kostea; ei metsäpalovaaraa	0-1.9	1.0-1.9
Maasto kostea	2-9.9	2.0-2.9
Maasto melko kostea		3.0-3.9
Maasto kuiva; metsäpalovaara	10-17.9	4.0-4.9
Maasto erittäin kuiva; suuri metsäpalovaara	18-24.9	5.0-5.9
Maasto erittäin kuiva; hyvin suuri metsäpalovaara	>25	6.0

2.2 Toistuvuusaikojen arviointi

Halutessamme arvioida esimerkiksi kuinka usein lämpötila ylittää jonkin hyvin korkean raja-arvon, Suomen ilmastossa vaikkapa 35°C , joudutaan arviota tehtäessä hyödyntämään ns. ääriarvoanalyysiä. Ääriarvoja analysoitaessa sovitetaan havaintoaineistoon ilmiön hyvin suuria arvoja kuvaava jakauma. Ääriarvojen yhteydessä käytetään usein termejä toistuvuusaika ja toistuvuustaso. Toistuvuusaika on ilmiön käänteinen todennäköisyys, se siis kuvaa aikaa, jonka aikana ilmiön voidaan odottaa esiintyvän keskimäärin kerran. Toistuvuustaso kertoo puolestaan ilmastollisen suureen

arvon, joka keskimäärin ylittyy tai alittuu kerran jossakin tietyssä toistuvuusajassa. Ääriarvojakaumien avulla voidaan esimerkiksi selvittää, kuinka korkealle lämpötila (= toistuvuutaso) voi kohota kerran 50 vuodessa (= toistuvuus aika).

Ääriarvoteorian perusmenetelmässä aineistosta poimitaan jokaiselta määrättyltä aikaväliltä, esimerkiksi jokaiselta vuodelta, suurin tai pienin arvo. Poimitut arvot, joiden oletetaan olevan toisistaan riippumattomia ja samalla tavoin jakautuneita, noudattavat yleistä GEV-ääriarvojakaumaa (Fisher ja Tippett, 1928; Gnedenko, 1943; Coles, 2001). Tässä raportissa toistuvuusajojen laskennassa on käytetty in2extRemes -ohjelmatyökalua, joka on kehitetty Yhdysvalloissa National Center of Atmospheric Research (NCAR) -instituutissa (Gilleland ym., 2005; Katz ym., 2005).

Pitkien toistuvuusajojen arviointi lyhyiden mittausaikaasarjojen perusteella on epäluotettavaa. Metsäpaloindeksin arvoja oli käytävissä vuodesta 1971 alkaen. Arvioitaessa tällaisten runsaan 40 vuoden mittaisten aikasarjojen avulla hyvin harvinaisten, kuten kerran 500 vuodessa esiintyvien tapahtumien toistuvuustasoja, arvioihin liittyy väistämättä suurta epävarmuutta.

2.4 Sää- ja ilmastotiedot: havainnot, uusanalyysit ja ilmastoskenaariot

Metsä- ja latvapaloindeksien laskentaan tarvittavat säätiedot saatiin Ilmatieteen laitoksen säähavainnoista. Västmanlandin läänin alueen suurpalon aikaiset sääaineistot haettiin Ruotsin ilmatieteen laitoksen SMHI:n (Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut) tietokannasta. Palon aikaisen säätilanteen tarkastelussa käytettiin myös sääsuureitten analyysijä, joita laaditaan kansainvälisissä säänennustuskeskuksissa. Nämä maailmanlaajuisia sääennusteita tuottavat säänennustuskeskukset tarvitsevat ennusteiden lähtötiedoiksi maailmanlaajuisen analyysin eli kuvauksen sääsuureiden 3-ulotteisesta jakaumasta ilmakehässä. Analyysin tekemisessä hyödynnetään kaikkia saatavilla olevia säähavaintoja, mukaan lukien perinteiset maan pinnalla tehdyt mittaukset, merillä tehdyt havainnot, ilmakehän luotaukset sekä kaukokartoitusmenetelmien avulla saadut tiedot. Näitä samoja analyysimenetelmiä on jälkikäteen hyödynnetty maailmanlaajuisen säätilojen uusanalyysien teossa. Omassa työssämme olemme käyttäneet Euroopan keskipitkien ennusteiden keskuksen (ECMWF) laatimia uusanalyysi-aineistoja, jotka tunnetaan lyhenteillä ERA-Interim (Dee ym., 2011) ja ERA-20C (Poli ym., 2015). ERA-Interim-aineisto kattaa ajanjakson vuodesta 1979 eteenpäin ja ERA-20C vuodesta 1900 vuoteen 2010. ERA-Interim-aineiston alueellinen tarkkuus on $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ ja ERA-20C:n $1^\circ \times 1^\circ$. ERA-20C-aineiston etuna on aineiston pitkä ajallinen kesto, mutta puutteena puolestaan se, että sen laadinnassa on hyödynnetty vain perinteisiä pintahavaintoja, koska 1900-luvun alkuvuosina ei muita havaintomenetelmiä vielä ollut käytössä. ERA-Interim-aineiston ja toisaalta asemilla tehtyjen havaintojen pohjalta lasketut FWI-indeksin arvot poikkeavat toisistaan jonkin verran. ERA-Interim-aineiston pohjalta saadaan systemaattisesti alhaisempia ääriarvoja johtuen siitä, että hilamuotoisessa aineistossa äärevimmät tilanteet aina jossain määrin tasoittuvat.

Ukkosten voimakkuutta ja todennäköisyyttä voidaan arvioida ilmakehän pystysuuntaisen lämpötilajakauman epävakautta kuvaavien indeksien avulla. Eräs yleisesti käytetty indeksiluku on ilmakehän vapautettavissa olevaa konvektiivista

potentiaalienergiaa kuvaava CAPE (Convective Available Potential Energy). Suuret CAPE-indeksin arvot kertovat, että säätilanne on otollinen voimakkaan konvektion (ilmapaketin nouseva liike) esiintymiselle, mikäli muut tekijät konvektion käynnistymiseksi ovat suotuisat. Tämä puolestaan lisää ukkosen todennäköisyyttä. CAPEn yksikkö on joulea kilogrammaa kohti, J/kg. Ukkosen syntymiselle ei kuitenkaan ole ehdotonta raja-arvoa, mutta CAPE:n alle 100 J/kg arvoilla ukkosia esiintyy verraten harvoin ja ne ovat melko heikkoja. Tässä tutkimuksessa poimittiin CAPE-indeksin arvot ERA-Interim-aineistosta ja selvitettiin, kuinka usein esiintyi tilanteita, joissa FWI-indeksin arvo oli yli 20 (suuri syyttymisvaara) ja CAPE saavutti ukkosten esiintymiselle otollisen raja-arvon.

Ilmastonmuutoksen vaikutuksen arviointi suurehkojen palojen mahdollisuuteen (Lehtonen ym., 2016) pohjautui viiden eri ilmastomallin avulla laskettuihin ilmastomuutosarvioihin (taulukko 2). Työssä tarkasteltiin kahta eri kasvihuonekaasuskenaariota: RCP4.5 (päästöjä rajoitetaan melko tehokkaasti) ja RCP8.5 (päästöt kasvavat hallitsemattomasti).

Tutkimuksessa verrattiin viime vuosikymmeninä vallinnutta tilannetta vuosien 2010–2039, 2040–2069 sekä 2070–2099 olosuhteisiin. Säätilan ja metsäpaloaktiivisuuden välinen yhteys johdettiin vuosien 1996–2014 havaintotiedoista.

Taulukko 2. Lehtosen ym. (2016) työssä käytetyt ilmastomallit. *L* viittaa mallissa olevien tasojen lukumäärään.

Malli	Mallin alkuperämaa	Alueellinen tarkkuus (pit. × lev.), ja mallin tasojen lukumäärä	Viite
CanESM2	Kanada	1.875° × 1.875°, L35	von Salzen ym. (2013)
CNRM-CM5	Ranska	1.4° × 1.4°, L31	Voltaire ym. (2013)
GFDL-CM3	Yhdysvallat	2.5° × 2.0°, L48	Donner ym. (2011)
HadGEM2-ES	Iso-Britannia	1.25° × 1.875°, L38	Collins ym. (2011)
MIROC5	Japani	1.4° × 1.4°, L40	Watanabe ym. (2010)

2.4 Suurpalojen yhteiskunnallisen sekä taloudellisen merkityksen arviointi

Kosenius ym. (2014) julkaisivat kattavan kustannusanalyysin metsäpalojen taloudellisesta merkityksestä Pohjois-Karjalan alueella. Tarkastelu pohjautui maakunnassa vuosien 2009–2013 aikana sattuneisiin metsäpaloihin. Laskelmissa huomioitiin sammutukseen ja valvontaan liittyvät kustannukset sekä puuntuotannon ja hiilensidonnan menetykset. Tässä tutkimuksessa on arvioitu Koseniuksen ym. (2014) tulosten pohjalta, millaisiksi eri kokoisten palojen kustannukset voisivat muodostua. Lisäksi tutkimuksessa haettiin arvioita Ruotsin kesän 2014 suurpalon aiheuttamista kustannuksista.

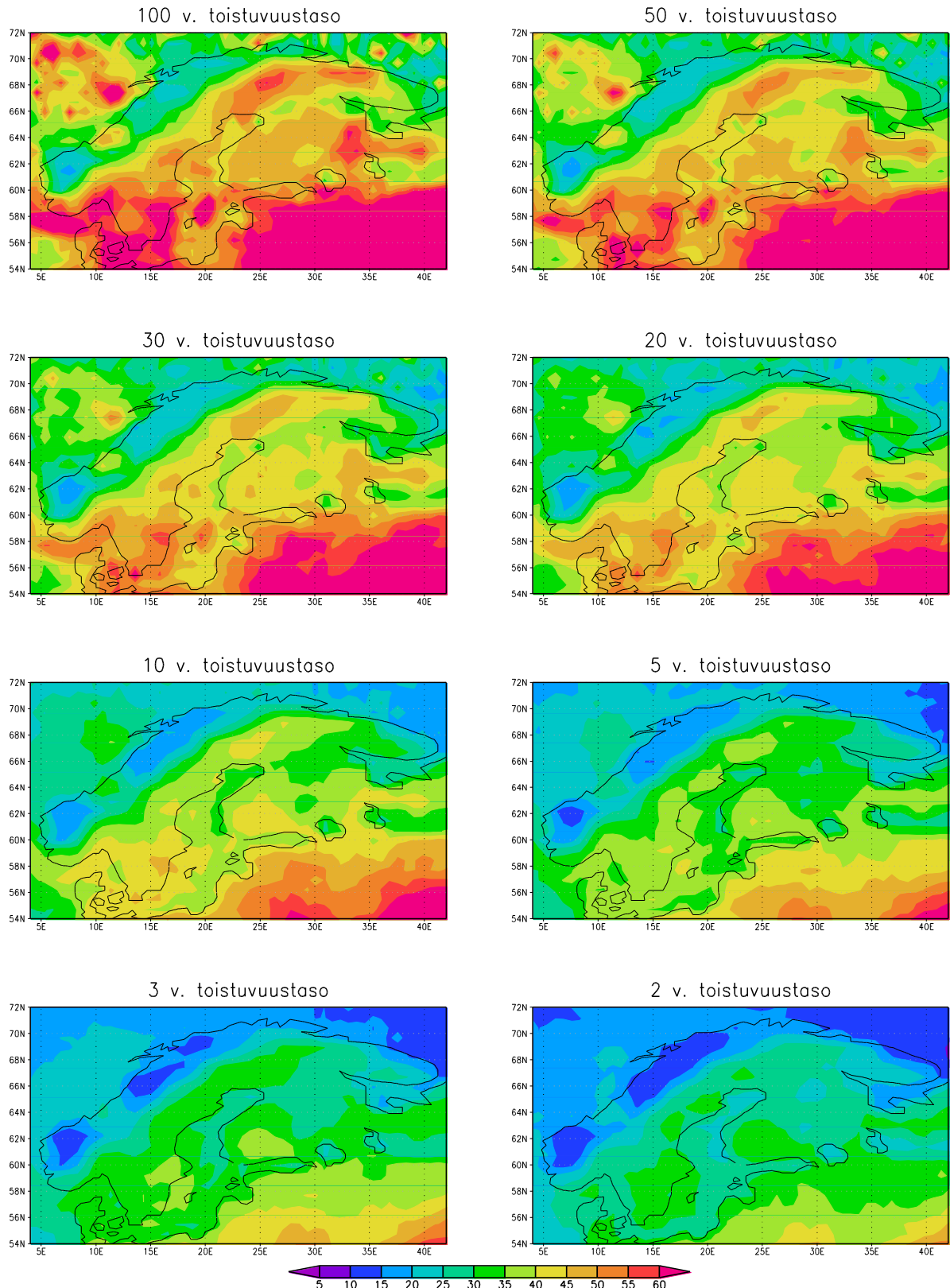
3. TULOKSET

3.1 Korkean metsäpaloaaran toistuvuustasot Pohjoismaissa

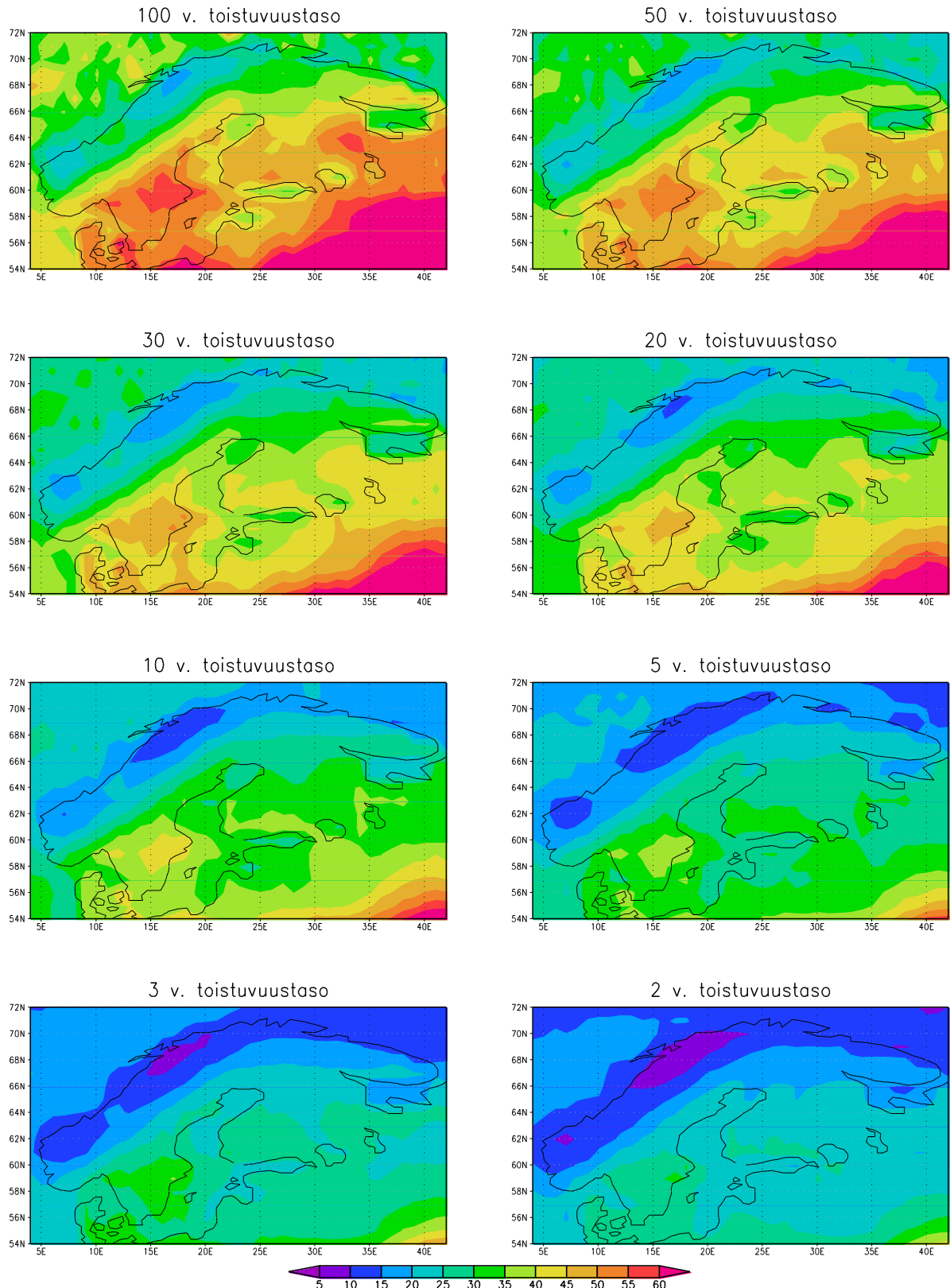
Korkean metsäpaloaaran toistuvuustasot Pohjois-Euroopan alueelle määritettiin ERA-Interim (jaksolle 1979–2014) ja ERA-20C (jaksolle 1900–2010) -aineistoista.

Tarkastelussa käytettiin kanadalaista FWI-indeksiä, koska kaikki tarvittavat parametrit tämän indeksin laskemiseen olivat saatavissa käytetyistä aineistoista ja myös, koska suomalainen FFI-indeksi saavuttaa maksimiarvonsa suurimmalla osalla alueesta lähes vuosittain. FWI- ja FFI-indeksien arvot eivät ole suoraan verrannollisia keskenään, mutta Vajdan ym. (2014) mukaan FFI-indeksin suurinta mahdollista arvoa 6 vastaa suurin piirtein FWI-indeksin arvo 25 ja FFI-indeksin arvoa 4, jolla metsäpalovaroitus Suomessa annetaan, vastaa suurin piirtein FWI-indeksin arvo 10 (taulukko 1).

FWI-indeksin eri toistuvuusajoja vastaavat toistuvuustasot on esitetty kuvissa 2 ja 3. Toistuvuustasot ovat keskimäärin jonkin verran korkeampia ERA-Interim kuin ERA-20C-aineistosta määritettyinä. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että metsäpaloriski olisi kasvanut 1900-luvun kuluessa, vaan ero selittyy pikemminkin uusanalyysiaineistojen erilaisilla muodostamistavoilla ja erilaisilla alueellisilla erotuskyvyillä. Yleisesti ottaen ERA-Interimiä voidaan pitää parempana aineistona kuin ERA-20C:tä, jonka muodostamisessa on hyödynnetty vain pintahavaintoja. ERA-20C-aineiston etuna on taas pidempi tarkastelu-aika, jonka johdosta etenkin korkeat toistuvuustasot voidaan määrittää luotettavammin, ja toistuvuustasojen alueellisissa jakaumissa on siksi vähemmän pienipiirteistä satunnaista vaihtelua. Jakaumien pääpiirteet ovat kuitenkin molemmissa aineistoissa hyvin samankaltaiset. Suomessa toistuvuustasot pienenevät keskimäärin pohjoista kohti mentäessä. Toisaalta Etelä-Suomessa toistuvuustasot ovat pienempiä kuin maamme kaakkoispuolella Venäjällä tai Baltiassa. Likimain suomalaisen FFI-indeksin asteikon ylintä arvoa vastaavia FWI-indeksin arvoja saavutetaan ERA-Interim-aineiston mukaan suurimmassa osassa Suomea useammin kuin joka toinen vuosi. Kerran 100 vuodessa, eli yksittäisenä vuotena 1 % todennäköisyydellä, FWI:n arvo voi kohota Suomessakin yli 50:een, joka on tyypillinen joka kesä mitattava arvo Etelä-Euroopassa ja Välimeren alueella (esim. Venäläinen ym., 2014).



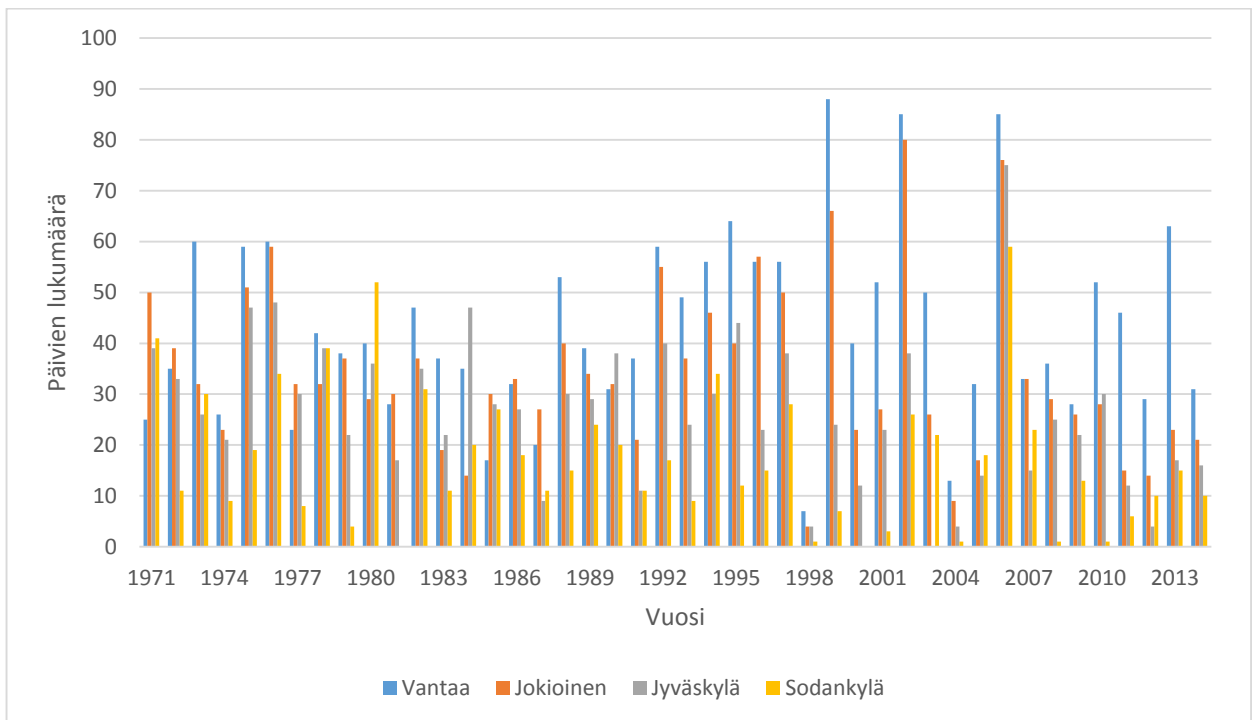
Kuva 2. Metsäpaloaaraa kuvaavan FWI-indeksin 100, 50, 30, 20, 10, 5, 3 ja 2 vuoden toistuvuustasot laskettuna jakson 1979–2014 ERA-Interim-aineistosta.



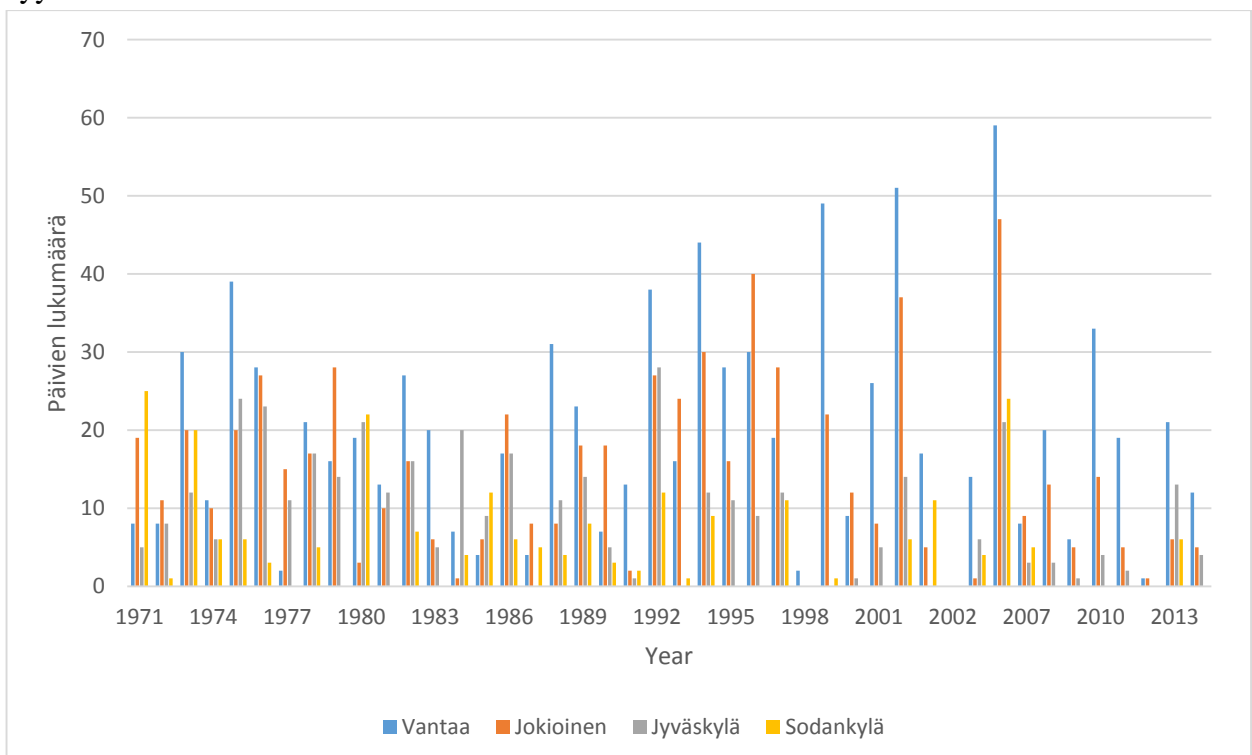
Kuva 3. Metsäpaloaaraa kuvaavan FWI-indeksin 100, 50, 30, 20, 10, 5, 3 ja 2 vuoden toistuvuustasot laskettuna jakson 1900–2010 ERA-20C-aineistosta.

Taulukko 3. Sellaisten päivien lukumäärä, joina metsäpaloindeksin arvo kello 12 UTC touko-
syyskuussa on ollut vähintään 4 tai 5.

Vuosi	Indeksi ≥ 4				Indeksi ≥ 5			
	Vantaa	Jokioinen	Jyväskylä	Sodankylä	Vantaa	Jokioinen	Jyväskylä	Sodankylä
1971	25	50	39	41	8	19	5	25
1972	35	39	33	11	8	11	8	1
1973	60	32	26	30	30	20	12	20
1974	26	23	21	9	11	10	6	6
1975	59	51	47	19	39	20	24	6
1976	60	59	48	34	28	27	23	3
1977	23	32	30	8	2	15	11	0
1978	42	32	39	39	21	17	17	5
1979	38	37	22	4	16	28	14	0
1980	40	29	36	52	19	3	21	22
1981	28	30	17	0	13	10	12	0
1982	47	37	35	31	27	16	16	7
1983	37	19	22	11	20	6	5	0
1984	35	14	47	20	7	1	20	4
1985	17	30	28	27	4	6	9	12
1986	32	33	27	18	17	22	17	6
1987	20	27	9	11	4	8	0	5
1988	53	40	30	15	31	8	11	4
1989	39	34	29	24	23	18	14	8
1990	31	32	38	20	7	18	5	3
1991	37	21	11	11	13	2	1	2
1992	59	55	40	17	38	27	28	12
1993	49	37	24	9	16	24	0	1
1994	56	46	30	34	44	30	12	9
1995	64	40	44	12	28	16	11	0
1996	56	57	23	15	30	40	9	0
1997	56	50	38	28	19	28	12	11
1998	7	4	4	1	2	0	0	0
1999	88	66	24	7	49	22	0	1
2000	40	23	12	0	9	12	1	0
2001	52	27	23	3	26	8	5	0
2002	85	80	38	26	51	37	14	6
2003	50	26	0	22	17	5	0	11
2004	13	9	4	1	0	0	0	0
2005	32	17	14	18	14	1	6	4
2006	85	76	75	59	59	47	21	24
2007	33	33	15	23	8	9	3	5
2008	36	29	25	1	20	13	3	0
2009	28	26	22	13	6	5	1	0
2010	52	28	30	1	33	14	4	0
2011	46	15	12	6	19	5	2	0
2012	29	14	4	10	1	1	0	0
2013	63	23	17	15	21	6	13	6
2014	31	21	16	10	12	5	4	0
KA	43.0	34.2	26.5	17.4	19.8	14.5	9.1	5.2
Suurin	88	80	75	59	59	47	28	25
Pienin	7	4	0	0	0	0	0	0



Kuva 4. Sellaisten päivien lukumäärä, jolloin metsäpaloindeksin arvo kello 12 UTC touko-
syyskuussa on ollut vähintään 4.



Kuva 5. Sellaisten päivien lukumäärä, jolloin metsäpaloindeksin arvo kello 12 UTC touko-
syyskuussa on ollut vähintään 5.

Latvapaloindeksillä ei ole ylärajaa, toisin kuin varsinaisella metsäpaloindeksillä. Tarkasteltavien neljän havaintoaseman havaintojen pohjalta latvapaloindeksi saavuttaa arvon 8–8,5 kerran kymmenessä vuodessa (10 % todennäköisyys) ja 1 % todennäköisyydellä arvo voi kohota yli 8,5:n. Tarkastellulla havaintojaksolla 1971–2014 oli yhdeksän sellaista päivää, jolloin latvapaloindeksin arvo vähintään kahdella tarkastelluista neljästä paikkakunnasta oli kahdeksan tai suurempi (taulukko 5). Tällaisissa tilanteissa metsien syttymisherkkyys on suuressa osassa maata erittäin suuri. Osa tapauksista on esiintynyt perättäisinä päivinä ja liittynyt siis samaan säätilanteeseen. Selvästi erillisiä suurpaloille otollisia tilanteita oli viisi kappaletta. Näillä kriteereillä arvioitaessa Suomen ilmastossa esiintyy noin kerran kymmenessä vuodessa sellainen tilanne, jolloin suuressa osassa maatamme metsät ovat erittäin kuivia, syttymisriski on suuri ja olosuhteet palon leviämislle suurpaloksi ovat siten otolliset. Tällaisissa tilanteissa jo syttyneen palon sammuttaminen ja palon leviämisen rajoittaminen olisi erittäin vaikea tehtävä.

Taulukko 5. Sellaiset päivät, jolloin latvapaloindeksin arvo vähintään kahdella tarkastelluista neljästä havaintoasemasta on ollut kahdeksan tai korkeampi.

Vuosi	Kuukausi	Päivä	Vantaa	Jokioinen	Jyväskylä	Sodankylä
1973	7	9	8.2	8.1	7.9	6.6
1973	7	17	8.4	8	6	7
1978	5	30	8.1	7.7	8.3	5.6
1978	6	1	8.1	8.1	8.7	5.7
1978	6	6	8.2	8.1	7.9	6
1979	6	3	7.7	8.1	8	5.1
1979	6	8	8.1	8.2	5.4	2.3
2006	8	12	8.3	8.2	6.9	5.6
2008	6	2	8.2	8	6.1	3.6

3.3 Suurpalotilanteiden aikana vallinneitten olosuhteiden tarkastelu

Suomessa on viime vuosikymmenien aikana sattunut vain muutama maastopalo, joissa paloala on ollut 200 ha tai enemmän. Tutkimuksessa käytiin näiden palojen ajankohdan säätilanteet läpi tavoitteena selvittää olosuhteiden poikkeuksellisuutta (taulukko 6). Palojen ajanhetkille laskettiin FWI-indeksin eri komponenttien arvot sekä tällaisten arvojen ylityksen toistuvuusajat. Jokaisesta FWI:n komponentista valittiin suurin arvo palon syttymistä edeltävän ja seuraavan päivän väliltä. FWI-indeksissä on kolme maan pintakerroksen kosteutta eri syvyyksillä kuvaavaa komponenttia; ”fine fuel moisture code” (FFMC), ”duff moisture code” (DMC) ja ”drought code” (DC) sekä kaksi palon leviämistä kuvaavaa komponenttia; ”initial spread index” (ISI) ja ”build up index” (BUI), joiden pohjalta FWI-indeksin lopullinen arvo lasketaan. Rantsilan vuoden 1969 ja sen jälkeisille suomalaisille suurpalojen päiville oli käytössä myös metsäpaloindeksin ja latvapaloindeksin arvot, jotka on myös esitetty taulukossa 6.

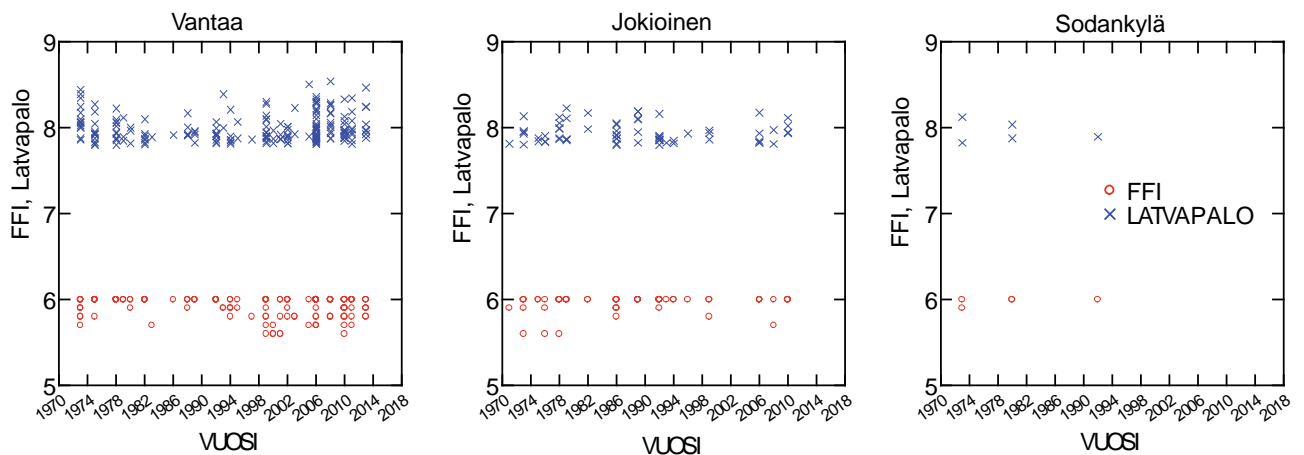
Taulukko 6. Suomessa käytettävän metsäpaloindeksin (FFI), latvapaloindeksin (LA) sekä FWI-indeksin komponenttien (selitykset, katso teksti yllä) arvot Suomen viime vuosikymmenien laaja-alaisimpien metsäpalojen aikaan. FWI-indeksin komponenteille on suluissa esitetty myös vastaavat toistuvuusajat vuosina. Taulukossa on mukana myös Ruotsissa 2014 raivonnan suurpalon syttymispäivän FWI-indeksin komponenttien arvot.

Päivämäärä	Paikkakunta ja paloala	FFI	LA	FFMC	DMC	DC	ISI	BUI	FWI
15.5.1959	Hyrnsalmi 200 ha			90,7 (0.2)	37,6 (<0.1)	111,2 (<0.1)	13,2 (0.3)	40,7 (<0.1)	24,4 (0.1)
19.7.1959	Honkajoki/Isojoki 1600 ha			91,7 (0.2)	133,7 (5,2)	511,7 (0.7)	11,1 (0.2)	161,7 (5.2)	39,8 (1.7)
30.6.1960	Salla-Tuntsa 20 000 ha			91 (0.1)	55,1 (0.1)	275,5 (<0.1)	14,6 (0.3)	73,5 (0.1)	34,9 (0.8)
21.7.1969	Rantsila 650 ha	5.8	7.6	90,6 (0.1)	128,8 (1.3)	500,6 (0.1)	11,5 (0.1)	156,8 (1.2)	19,1 (0.6)
9.8.1969	Tyrnävä/Muhos 1300 ha	5.9	7.9	91,5 (0.3)	177,5 (3.7)	637,6 (1.3)	13 (0.1)	209,3 (3.7)	46,3 (1.9)
24.6.1970	Kalajoki 1600 ha	5.9	7.9	91,9 (0.3)	106,1 (1.2)	313,3 (<0.1)	18,4 (0.3)	114,9 (0.6)	48,2 (1.5)
26.6.1970	Liminka 500 ha	5.9	7.8	91,2 (0.2)	98,4 (0.7)	305,4 (<0.1)	12,5 (0.1)	109 (0.3)	37,8 (0.4)
9.6.1997	Tammela 200 ha	5.8	7.9	92,6 (1.0)	87 (0.3)	207 (<0.1)	15,3 (0.2)	87 (0.1)	38,4 (0.4)
31.7.2014	Sala/Surahammar 14 000 ha			84,4 (<0.1)	53,6 (0.1)	497 (0.1)	3,3 (<0.1)	84,5 (0.1)	12,8 (<0.1)

Suurten palojen aikana metsäpaloindeksin (FFI) arvo oli kaikissa tapauksissa lähellä maksiarvoa 6 ja samalla latvapaloindeksin arvo oli yli 7,5. Tarkasteltaessa FWI:n ja sen komponenttien arvoja nähdään, että yhdenkään palon syttymisen aikoihin vallinnut metsäpaloriski ei ollut poikkeuksellisen korkea ja FWI:n arvo oli pienempi kuin 50; suurempia FWI-indeksin arvoja on saavutettu jokaisella paikkakunnalla keskimäärin vähintäänkin kerran kahdessa vuodessa. Kahden palon tapauksessa DMC ja BUI saavuttivat harvemmin, noin kerran 4–5 vuodessa toistuvia arvoja. Se, etteivät indeksien arvot olleet tämän poikkeuksellisempia, ei kuitenkaan ole mitenkään yllättävää, koska korkeankin metsäpaloaaran vallitessa metsäpaloja syttyy vain harvoin, vaikka palojen syttymisen todennäköisyys kasvaakin lähes eksponentiaalisesti paloriskin kasvaessa (Lehtonen ym., 2016). Lisäksi metsäpalojen keskimääräinen koko kasvaa sitä mukaa mitä korkeamman metsäpaloindeksin arvon vallitessa palot ovat syttyneet (Lehtonen ym., 2016). Kaikkien taulukon 6 palojen läheisyydestä ei myöskään ollut käytettävissä pitkiä aikasarjoja säähavainnoista, joten valituille asemille lasketut toistuvuusajat eivät välttämättä kuvaa olosuhteita itse palopaikalla. Lisäksi esimerkiksi Salan suurpalon tapauksessa FWI-indeksin mukaan paljon otollisemmat olosuhteet metsäpalon leviämisen kannalta vallitsivat palon syttymistä seuraavien päivien aikana, jolloin palo vasta todella levisikin hallitsemattoman laajaksi.

Taulukon 6 perusteella suurpalojen sattuessa FFI:n arvo oli siis lähellä maksimiarvoa 6 ja latvapaloindeksin arvo yli 7,5. Näiden kriteerien pohjalta haettiin kolmen havaintoaseman vuosien 1971–2014 havainnoista tilanteet, jolloin metsäpaloindeksin (FFI) arvo oli suurempi kuin 5,5 ja samalla latvapaloindeksin arvo suurempi kuin 7,8. Päiviä, jolloin nämä kriteerit täyttyivät, löytyi Vantaalla 114, Jokioisilla 31 ja Sodankylässä 5

kappaletta koko jakson aikana. Kuiva korkeapainesää jatkuu tyypillisesti useita vuorokausia, joten sääepisodeja, joihin vaaralliset tilanteet liittyivät, löytyi Vantaan havaintojen mukaan 35 kappaletta, Jokioisilla 19 ja Sodankylässä 3 (kuva 6). Tämän mukaan Etelä-Suomessa olisi keskimäärin joka kesä tilanne, jolloin suurpalo olisi mahdollinen mutta Pohjois-Suomessa vain noin kerran 10 vuodessa.

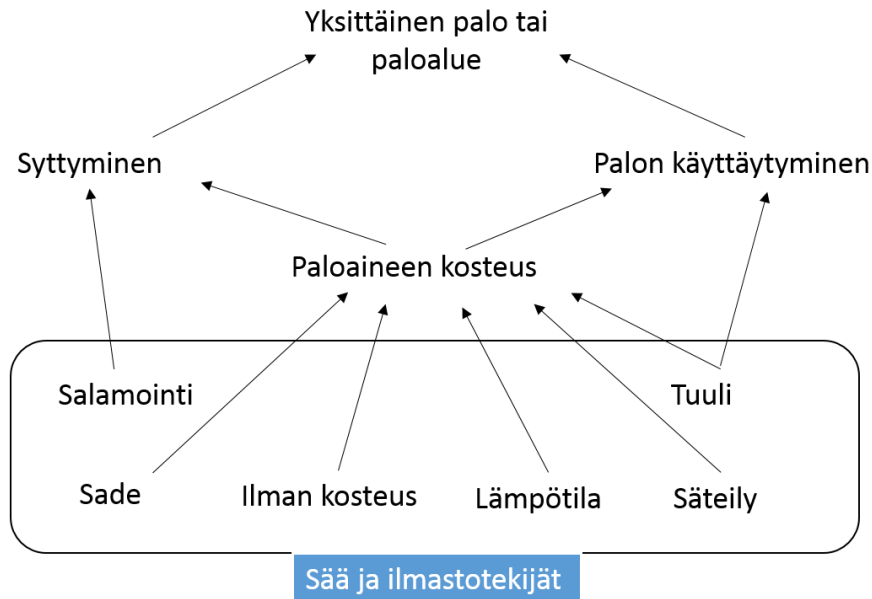


Kuva 6. Sellaisten tilanteiden esiintyminen, joissa $FFI > 5.5$ ja Latvapaloindeksi > 7.8 .

3.4 Salamet suurpalojen aiheuttajina

Salamalla on mahdollisuus sytyttää metsäpalo, jos salama iskee alustaan tai kohteeseen, joka on syttymisherkässä tilassa (kuva 7). Vaikka salaman sähkövirta ja lämpötila ovat huomattavan korkeita (keskimäärin noin 15 000 ampeeria ja 30 000°C), pääsalaman lyhyen keston (muutamia mikrosekunteja) vuoksi palo syttyy käytännössä vain harvoin.

Puut ovat Suomessa otollisia iskukohteita: ne erottuvat ympäristöstä korkeuden sekä geometrian (terävä latva) sekä kohtuullisen hyvän sähkönjohtavuutensa takia. Ilmatieteen laitoksen keräämien havaintojen (Mäkelä ym., 2009) perusteella on voitu todeta, että salaman iskemän puun vahingon laatuun vaikuttaa keskeisesti edeltäneen ajanhetken sade; jos puu on pinnaltaan märkä, virta kulkee todennäköisemmin puun runkoa pitkin maahan eikä vahinkoja välttämättä esiinny lainkaan. Puunrungon ollessa kuiva vahingot vaihtelevat usein pintavaurioista räjähdykseen. Puututkimusten tulokset pätevät myös metsäpaloihin: mitä kosteampi alusta, sitä epätodennäköisempää on palon syttyminen.



Kuva 7. Kaaviokuva eri säätekijöiden osuudesta metsäpalojen syttymiseen (Larjavaara, 2005).

Paloaineen kosteus on siis keskeinen tekijä salaman sytyttämän metsäpalon kannalta. Ukkonen vaatii aina esiintyäkseen kuuropilven (cumulonimbus), joka sataa käytännössä aina rankasti. Toisaalta kuuro sade on alueellisesti hyvin rajallinen ja lyhytkestoinen (riippuu pilven etenemisnopeudesta), ja salamat puolestaan voivat iskeä kauaksikin kuuro sadeytimeistä. Joissakin olosuhteissa osa sateesta voi haihtua ennen maahan osumista, jolloin alusta ei paljoa kastu. Jos ukkosta on edeltänyt pitempi kuiva jakso, alusta voi olla niin kuiva, ettei lyhytkestoinen ukkossade ehdi kastella sitä riittävästi.

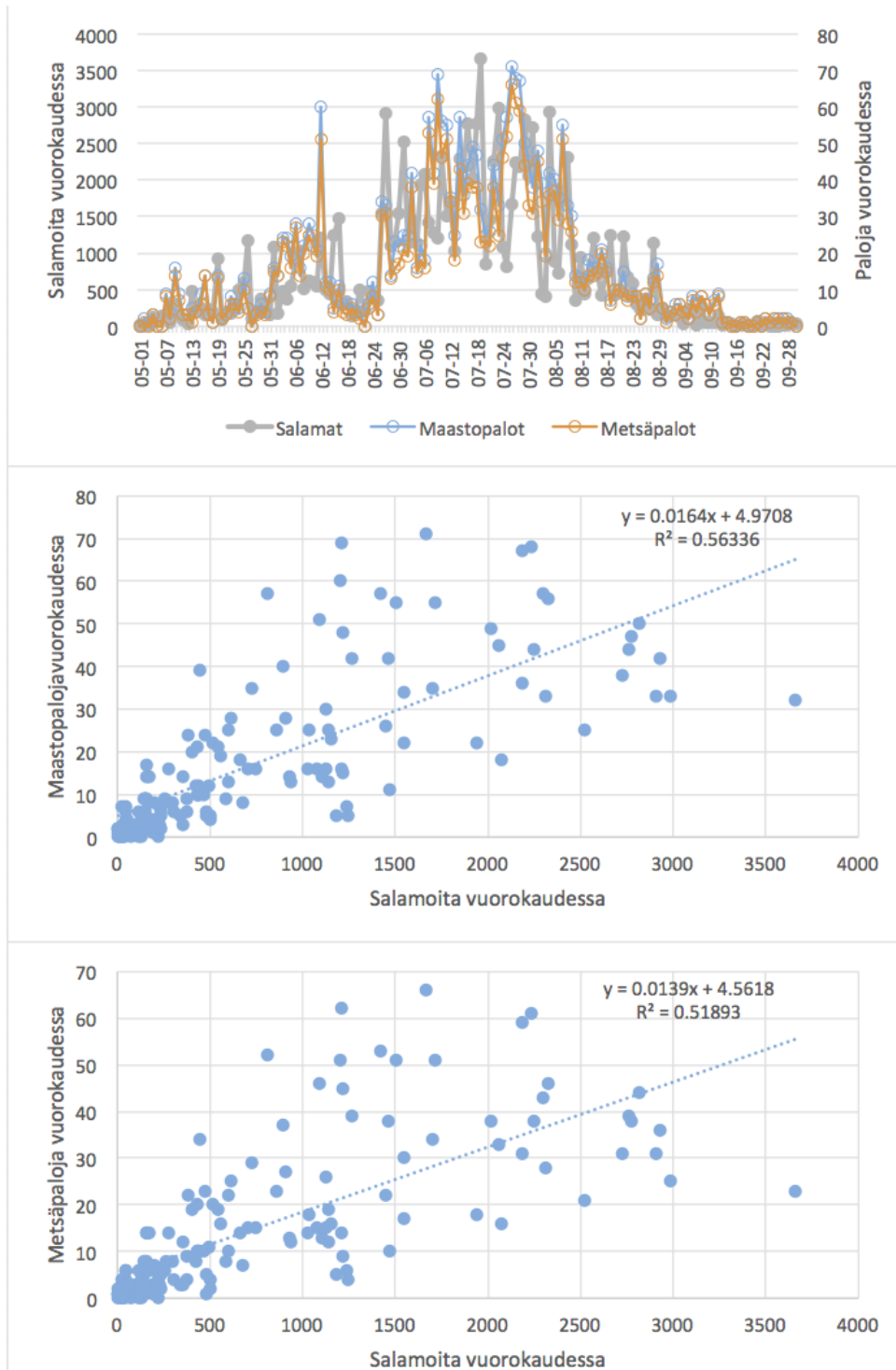
Teoreettisesti voidaan ajatella, että salamalla on tietty todennäköisyys p sytyttää metsäpalo, ja p riippuu keskeisesti alustan laadusta. Jos ukkonen tuottaa elinaikanaan N kappaletta salamoita, on ukkosen synnyttämän metsäpalon todennäköisyys $P = Np$. Näin ollen mitä enemmän salamoita ukkonen tuottaa (= ukkosen voimakkuus), sitä suurempi on todennäköisyys metsäpalon esiintymiseen. Koska kuitenkin alustan ominaisuudet ovat ratkaisevan tärkeitä, ukkosen esiintyminen ja sen voimakkuus pitää ymmärtää vain ”salaman sytyttämän metsäpalon potentiaalina”.

Kuvassa 8 on esitettyinä jakson 1998–2014 (touko-syyskuu) paikannettujen maasalamoiden sekä Pronto-tietokannasta kerättyjen maasto- ja metsäpalojen vuorokausittaisen lukumäärien vertailu. Kuvasta nähdään, että salamoiden lukumäärä korreloi maasto- ja metsäpalojen lukumäärien kanssa. Havainto tukee teoriaa siitä, että voimakkaalla ukkosella on suurempi todennäköisyys aiheuttaa metsä- tai maastopalo.

Yhteenvedon voidaan todeta, että keskeisimmät ukkospilven ominaisuudet palon syttymisen kannalta ovat:

1. Ukkosen voimakkuus (salamoiden määrä): mitä enemmän salamoita ukkonen tuottaa, sitä suurempi on todennäköisyys, että ukkonen aiheuttaa metsäpalon.
2. Ukkosen liikenopeus: ukkospilven etenemisnopeus vaihtelee suuresti (n. 40 – 100 km/h). Mitä nopeammin ukkonen etenee, sitä vähemmän aikaa se ehtii kastella alustaa.
3. Sademäärä: mitä enemmän ukkonen tuottaa sadetta, sitä enemmän alusta kastuu, ja

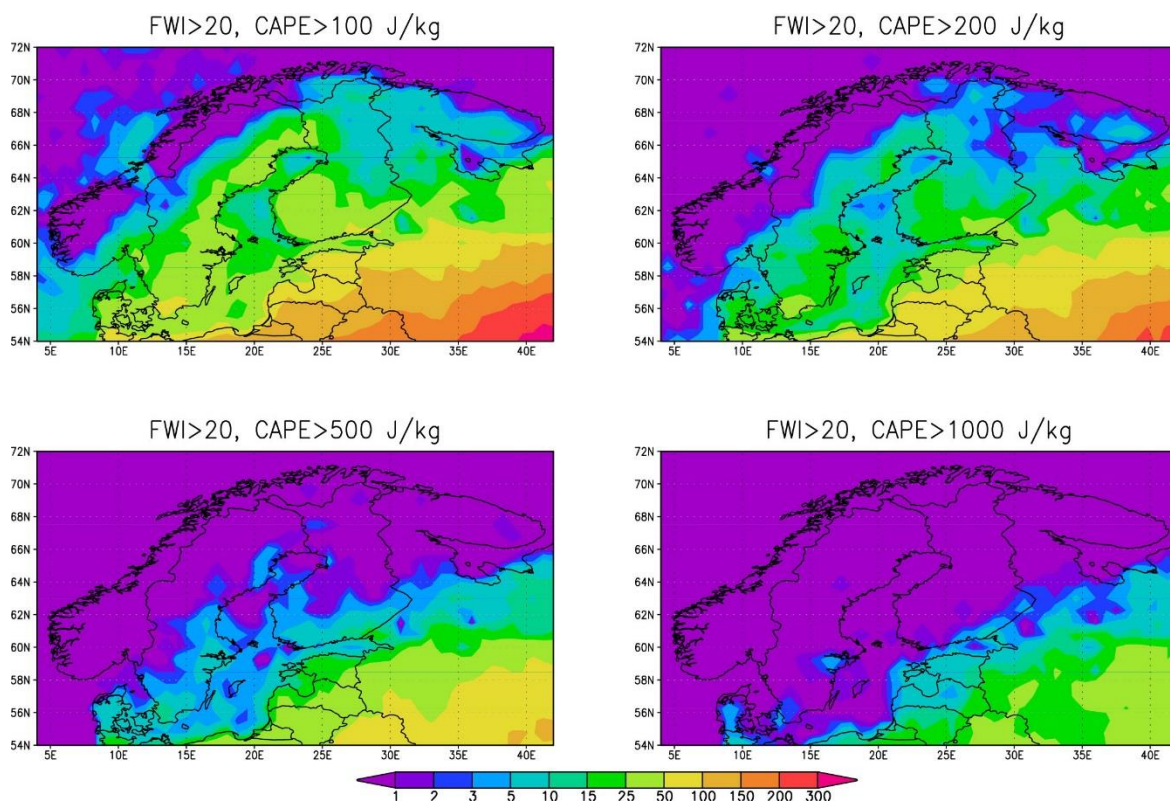
sitä epätodennäköisempää on palon syttyminen ja mahdollisesti jo syttynyt palo sammuu nopeasti.



Kuva 8. Paikannettujen maasalamoiden ja palojen keskimääräinen lukumäärä vuorokaudessa touko-syyskuussa (ylin kuva) sekä salamoinnin ja havaittujen maasto- ja metsäpalojen välinen yhteys jaksolla 1998–2014 (keskimmäinen ja alimmainen kuva). Kahteen alimpaan kuvaan on merkitty muuttujien riippuvuutta havainnollistava regressiosuora ja muuttujien välisen korrelaatiokertoimen neliö.

Koska kaikkia yllä mainittuja ukkospilven ominaisuuksia voidaan nykyään havaita reaaliajassa salamanpaikantimien sekä säätutkien avulla, olisi tulevaisuudessa mahdollista luoda reaaliaikainen varoitusjärjestelmä, joka huomio sekä havaitut ukkospilvet että niiden kulkureitille osuvan alustan ominaisuudet. Järjestelmä varoittaisi loppukäyttäjää kertoen alueet, joilla salaman sytyttämän palon todennäköisyys on suuri. Verrattuna perinteiseen ja käytössä olevaan metsäpalomalliin uusi järjestelmä toisi mukaan tilanteiden reaaliaikaisen seurannan ja sen myötä resurssien tehokkaamman käytön.

Kuvassa 9 on esitetty ERA-Interim-aineiston pohjalta niiden jakson 1979–2014 päivien lukumäärät, jolloin FWI-indeksin lukuarvo on ollut yli 20 ja CAPE on samaan aikaan ylittänyt valitun raja-arvon. Kartta kuvaa siis korkean metsäpalovaaran ja samanaikaisen voimakkaiden ukkosten kohonneen todennäköisyyden alueellista jakaumaa. Nähdään, että tällaisten tilanteiden todennäköisyys kasvaa kohti kaakkoa ja on maamme kaakkoispuolella ja Baltiassa huomattavasti suurempi kuin meillä. Tämä johtuu siitä, että sekä korkean metsäpalovaaran että voimakkaille ukkosille otollisten tilanteiden lukumäärät ovat maamme kaakkoispuolella suuremmat kuin Suomessa. Suomen rajojen sisällä korkea metsäpalovaara vallitsee ukkosille otollisten olosuhteiden vallitessa useammin maan etelä- kuin pohjoisosissa.



Kuva 9. Sellaisten päivien lukumäärät, jolloin FWI-indeksin arvo on ollut yli 20 ja CAPE on samaan aikaan ylittänyt arvon 100, 200, 500 tai 1000 J/kg. Tarkastelu pohjautuu jaksoon 1979–2014, ja säätiedot ovat peräisin ERA-Interim aineistosta kello 12 UTC ajanhetkille.

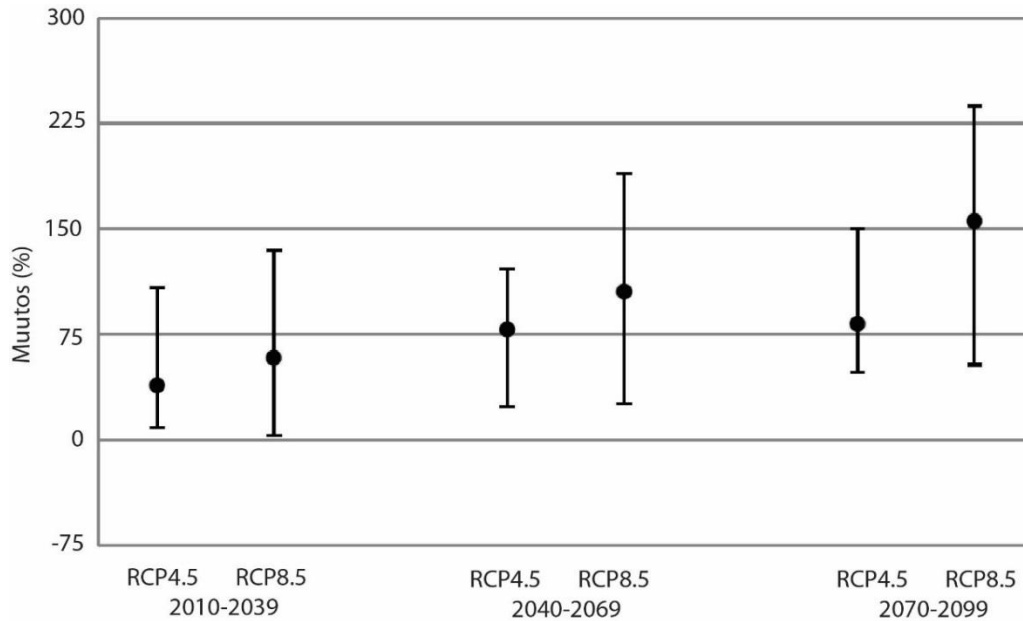
3.5 Ilmastonmuutoksen vaikutus suurpalojen esiintymiseen

Ilmastonmuutoksen vaikutusta meteorologiseen metsäpaloriskiin Suomen oloissa on selvitetty useammassakin tutkimuksessa. Lehtosen ym. (2016) työssä mallinnettiin viiden eri ilmastomallin (taulukko 2) tulosten avulla vuosittaista paloalaa ja Suomen oloissa suurehkojen, yli 10 ha, metsäpalojen lukumäärää. Tausta-aineistona käytettiin pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilastosta (PRONTO) poimittuja tietoja Suomessa sattuneista maastopaloista vuosina 1996–2014. Yhdistämällä PRONTO:sta poimitut metsäpalotiedot tiheähilaiseen sääaineistoon johdettiin yhteys metsäpalojen esiintymisen ja vallitsevan sään välille.

Vuosittainen havaittu paloala noudatteli jaksolla 1996–2014 kohtalaisen hyvin mallin antamaa ennustetta. Yli 10 ha palojen havaittu lukumäärä seurasi jonkin verran huonommin niiden mallinnettua lukumäärää. Parhaiten todellinen paloala vastasi meteorologisesta metsäpaloriskistä johdettua ennustetta heinäkuussa, jolloin suurin osa yli 10 ha paloista oli salaman sytyttämiä. Vastaavasti metsäpaloriskin ja paloaktiivisuuden välinen yhteys oli heikoin toukokuussa, jolloin metsäpalot ovat etupäässä seurausta ihmistoiminnasta, esimerkiksi roskien poltosta tai kulotuksesta karanneita paloja. Ylipäätään suurehkoja metsäpaloja on Suomessa parin viimeisen vuosikymmenen aikana sattunut selvästi eniten toukokuun jälkipuoliskolla ja kesäkuun alussa, ja nämä palot ovat olleet lähes yksinomaan ihmistoiminnan aiheuttamia.

Lehtosen ym. (2016) tutkimus paljasti suuren ilmastomallien välisen hajonnan metsäpaloriskin tulevaa muutosta arvioitaessa (kuva 10). Yksikään käytetyistä viidestä ilmastomallista ei ennakoanut metsäpaloriskin pienenevän kuluvaan vuosisadan aikana, mutta arviot paloriskin kasvamisen suuruudesta vaihtelivat mallien välillä huomattavasti. Pienimmillään mallit ennakoivat vain vähäistä kasvua metsäpaloriskissä, mutta suurehkojen yli 10 ha metsäpalojen määrä voi tulosten valossa yhtä hyvin jopa kolminkertaistua vuosisadan loppuun mennessä. Vuosittaisessa paloalassa tämä tarkoittaisi vielä suurempaa muutosta. Toisaalta pelkästään Västmanlandin suurpalossa Ruotsissa v. 2014 metsää paloi enemmän kuin Suomen kaikissa metsäpaloissa viimeisten noin 20 vuoden aikana yhteensä. Toisin sanoen yksikin suurpalo helposti moninkertaistaisi keskimääräisen paloalan. Todennäköisimmin Lehtosen ym. (2016) tulosten mukaan suurehkojen yli 10 ha metsäpalojen lukumäärä voisi likimain kaksinkertaistua, mikä kasvattaisi riskiä sille, että joku tai jotkut paloista voisivat päästä leviämään todellisiksi suurpaloiksi asti.

Metsäpaloriskin kasvu riippuu myös selvästi kasvihuonekaasujen tulevasta määrästä, varsinkin vuosisadan loppupuolella. Mallien antaman ennusteen mukaan riski kasvaisi RCP8.5-skenaarion mukaan noin kaksi kertaa nopeammin kuin RCP4.5-skenaarion toteutuessa.



Kuva 10. Ilmastonmuutoksen vaikutus suurehkojen yli 10 ha metsäpalojen määrään tulevina vuosikymmeninä pohjautuen Lehtosen ym. (2016) tutkimukseen. Laskelmat pohjautuvat viiden eri ilmastomallin (taulukko 2) antamiin ilmastonmuutosarvioihin. Pystypalkki kuvaa mallien antamien ennusteiden vaihteluväliä ja ympyrä mallien pohjalta laskettua keskimääräistä ennustetta. Muutosarviot on annettu erikseen melko pienten kasvihuonekaasupäästöjen RCP4.5-skenaariolle ja hyvin suurten päästöjen RCP8.5-skenaariolle.

3.6 Suurpalojen taloudellinen ja yhteiskunnallinen merkitys

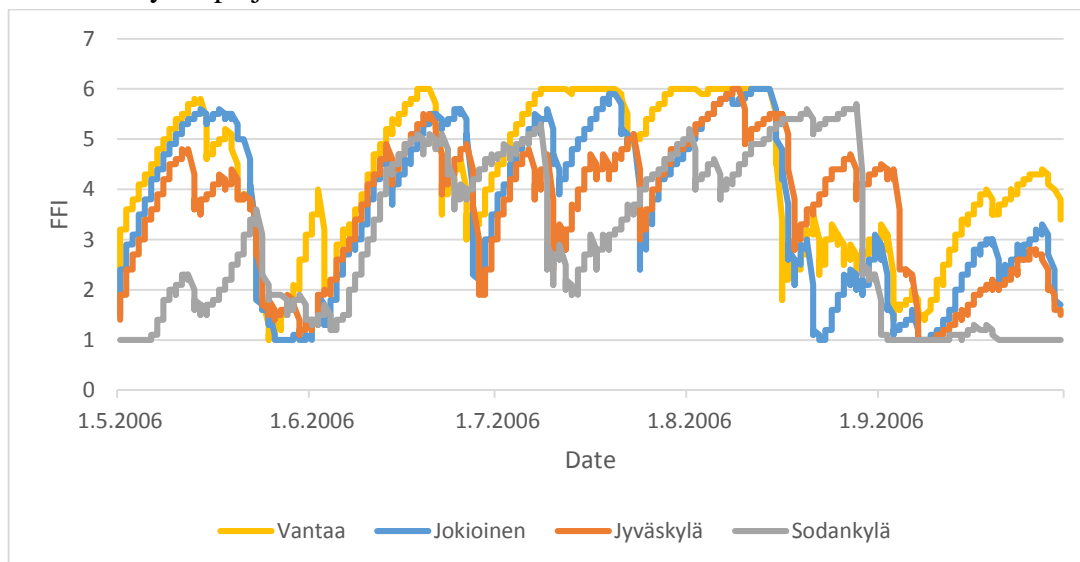
Kosenius ym. (2014) arvioivat metsäpalojen taloudellista merkitystä Pohjois-Karjalassa sekä Karjalan tasavallassa Venäjän puolella. Kustannuksia arvioitaessa käsiteltiin sekä suoria ja epäsuoria kustannuksia. Suoria kustannuksia ovat esimerkiksi ekosysteemipalveluiden menetykset, kuten palaneet puut, menetetyt marjat ja sienet, metsän huonontunut virkistysarvo, hiilinielun katoaminen, terveystaitat, sammutuskustannukset jne. Epäsuorat kustannukset muodostuvat ennaltaehkäisyn ja valvonnan aiheuttamista kustannuksista (Kosenius ym., 2014, taulukko 3.1). Heidän arvionsa mukaan metsäpalojen kustannukset palanutta hehtaaria kohti olivat v. 2009 5907 €/ha, v. 2010 7039 €/ha, v. 2011 7589 €/ha ja v. 2012 12610 €/ha. Vuoden 2012 arvo on korkea, koska tuolloin paloala oli vain 3 ha, jonka seurauksena valvonnan kustannukset jaettuna muutamalle hehtaarille kohottavat tällä tavoin lasketut kustannukset kovin suuriksi. Jos vähennetään arvioidut valvontalentojen kustannukset, niin hehtaaria kohti lasketut kustannukset vaihtelevat vuoden 2009 5381 €/ha ja vuoden 2012 8810 €/ha välillä. Neljän vuoden mediaanikustannus palanutta hehtaaria kohti on 6660 €/ha. Jos käytämme tätä summaa suoraan kustannusten arviointiin, päädyimme arvioon, että 500 ha palon kustannukset olisivat tuolloin 3.3 M€, 1 000 ha palon 6.6 M€, ja 10 000 ha palon 66 M€.

Ruotsissa kesällä 2014 riehuneen suurpalon laajuus oli noin 14 000 ha. Ruotsin valtio antoi palosta kärsineille kunnille yhteensä 300 milj. Ruotsin kruunua eli noin 31 milj. euroa palon sammuttamisesta syntyneiden kustannusten korvaamiseen (<https://www.sala.>

se/Kris--sakerhet/Skogsbranden-i-Sala-2014/Ersättningsansprak/). Lehdissä on esitetty arvioita, että palon kokonaiskustannukset (<http://www.dn.se/nyheter/sverige/slutnotan-arpa-vag-att-na-miljardbelopp/>) kohoaisivat jopa miljardiin Ruotsin kruunuun eli noin 100 milj. euroon. Saman suuruusluokan arvion on esittänyt myös Västmanlandin läänin hallinto (Länsstyrelsen, 2015). Tällöin palon kustannukset olisivat olleet noin 7000 €/ha. Suuruusluokaltaan Koseniuksen ym. (2014) esittämät arviot sekä Ruotsin suurpalon kustannusten arviot ovat siis varsin lähellä toisiaan.

4. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen mukaan yksittäisellä paikkakunnalla Etelä-Suomessa esiintyy lähes vuosittain säätilanne, joka mahdollistaisi syttyneen metsäpalon leviämisen suurpaloksi. Keski-Suomessa tällaisia tilanteita on noin joka kolmas vuosi ja maamme pohjoisosassa suunnilleen kerran kymmenessä vuodessa. Karkeasti arvioiden kerran kymmenessä vuodessa näyttäisi maamme päälle juuttuvan pitkäaikainen korkeapaine, jonka seurauksena suurimmassa osassa maamme metsät ovat erittäin syttymisherkkiä ja samanaikaisesti mahdollisesti sattuva voimakas tuuli, ilman korkea lämpötila ja alhainen kosteus lisäävät mahdollisen palon leviämisen vaaraa. Etelä-Euroopassa ja Välimeren alueella tällaisia olosuhteita tavataan tyypillisesti joka vuosi. Ilmaston lämmetessä tulevana vuosikymmeninä tällaisten erittäin palovaarallisten tilanteiden arvioidaan yleistyvän merkittävästi. Esimerkiksi kesällä 2006 olosuhteet suurpalon syttymiselle olivat hyvin otolliset; maasto oli suuressa osassa maata erittäin kuivaa useiden kymmenien päivien ajan (kuva 11). Tuolloin suurpalolta onneksi säästyttiin, mutta lukuisat pienemmät palot kuormittivat pelastuslaitoksia hyvin paljon.



Kuva 11. Metsäpaloindeksi (FFI) arvot Vantaalla, Jokioisilla, Jyväskylässä ja Sodankylässä kesällä 2006. Laskelma laadittiin kolmen tunnin välein tehtyjen säähavaintojen pohjalta.

Ukkonen on ainoa luonnollinen maasto- ja metsäpalojen aiheuttaja. Tämän tutkimuksen mukaan salamoiden aiheuttamien palojen lukumäärällä on selvä yhteys

salamamääriin; mitä enemmän salamoita ukkonen tuottaa, sitä todennäköisempää on palon syttyminen. Salamamäärän lisäksi ukkosen tuottamalla sademäärällä on vaikutusta palon esiintymiseen. Ukkospilven ominaisuuksista voidaan nykyään saada havaintotietoa reaaliajassa salamanpaikantimen sekä säätutkan avulla, ja olisikin mahdollista luoda reaaliaikainen varoitusjärjestelmä, joka ottaa huomioon sekä havaitun ukkosen että sen kulkureitille osuvan alustan ominaisuudet. Järjestelmä varoittaisi loppukäyttäjää niillä alueilla, joilla salaman sytyttämän palon todennäköisyys on suuri.

Aiempien selvitysten sekä Ruotsissa kesällä 2014 riehuneen palon kustannusten arvioiden mukaan metsäpaloista kertyisi kustannuksia 5 000 – 10 000 € / palanut hehtaari. Mahdollisen 10 000 ha kokoluokkaa olevan suurpalon taloudelliset seuraamukset olisivat siten useita kymmeniä miljoonia euroja. Tämä korostaa kulojen ennaltaehkäisyn tärkeyttä; Suomen ilmasto ei suojaa meiltä tällaisilta tapahtumilta. Suurpalot ovat mahdollisia, ja olosuhteet niiden syttymiselle ovat erittäin suotuisat useita kertoja 100 vuoden aikana. Ilmastonmuutoksen seurauksena suurpalojen esiintymiselle otolliset säätilanteet yhä yleistyvät. Metsäpalojen ennaltaehkäisyyn ja sammuttamiseen liittyvien riskianalyyysien ajan tasalla pitäminen onkin tärkeää.

KIITOKSET

Tässä raportissa esitetyt tulokset pohjautuvat pääasiassa Palosuojelurahaston rahoittamaan ja Ilmatieteen laitoksen toteuttamaan tutkimushankkeeseen ”Suurpalojen mahdollisuus Suomessa”. Lisäksi hankkeen toteuttamiseen on saatu tukea Strategisen tutkimuksen neuvostolta (STN) hankkeen ”Kestävä, ilmastoneutraali ja resurssitehokas metsäbiotalous (FORBIO)” sekä Suomen Akatemian rahoittaman ADAPT-hankkeen (Adaptation of forest management to climate change: uncertainties, impacts, and risks to forests and forestry in Finland) puitteissa. Kiitokset myös raportin tarkastaneelle Kimmo Ruosteenojalle hyvistä korjausehdotuksista.

Kirjallisuusluettelo

- Anttila, P., Makkonen, U., Hellen, H., Kyllönen, K., Leppänen, S., Saari, H. and Hakola, H., 2008. Impact of the open biomass fires in spring and summer of 2006 on the chemical composition of background air in south-eastern Finland. *Atmospheric Environment* 42, pp. 6472-6486.
- Coles, S., 2001. An introduction to statistical modeling of extreme values. Springer-Verlag, Lontoo, 204 s.
- Collins, W., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C.D., Joshi, M., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Senior, C., Sitch, S., Totterdell, I., Wiltshire, A. ja Woodward, S., 2011. Development

- and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2, *Geosci. Model Dev.*, 4, 1051–1075.
- Dee, D., Uppala, S., Simmons, A., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hersbach, H., Hólm, E., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J., Park, B., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N. ja Vitart, F., 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 137, 553–597.
- Donner, L.J., Wyman, B.L., Hemler, R.S., Horowitz, L.W., Ming, Y., Zhao, M., Golaz, J.-C., Ginoux, P., Lin, S.-J., Schwarzkopf, M.D., Austin, J., Alaka, G., Cooke, W.F., Delworth, T.L., Freidenreich, S.M., Gordon, C.T., Griffies, S.M., Held, I.M., Hurlin, W.J., Klein, S.A., Knutson, T.R., Langenhorst, A.R., Lee, H.-C., Lin, Y., Magi, B.I., Malyshev, S.L., Milly, P.C.D., Naik, V., Nath, M.J., Pincus, R., Ploshay, J.J., Ramaswamy, V., Seman, C.J., Shevliakova, E., Sirutis, J.J., Stern, W.F., Stouffer, R.J., Wilson, R.J., Winton, M., Wittenberg, A.T. ja Zeng, F., 2011. The dynamical core, physical parameterizations, and basic simulation characteristics of the atmospheric component AM3 of the GFDL global coupled model CM3, *J. Climate*, 24, 3484–3519.
- Fisher, R. ja Tippett, L., 1928. Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of sample. *PCPS-P. Camb. Philol. S.*, 24, 180–190.
- Gnedenko, B.V., 1943. Sur la distribution limite du terme maximum d'une serie aleatoire, *Ann. Math.*, 44, 423–453.
- Gilleland, E., Katz, R. ja Young, G., 2005. Extremes toolkit (extRemes): Weather and climate applications of extreme value statistics. <http://www.assessment.ucar.edu/toolkit/>.
- Katz, R.W., Brush, G.S. ja Parlange, M., 2005. Statistics of extremes: Modeling ecological disturbances. *Ecology*, 86(5), 1124–1134.
- Kilpeläinen A., Kellomäki S., Strandman H. ja Venäläinen A., 2010. Climate change impacts on forest fire potential in boreal conditions in Finland. *Clim. Change*, 103, 383–398.
- Kosenius, A.-K., Tulla, T., Horne, P., Vanha-Majamaa, I. ja Kerkelä, L., 2014. Metsäpalojen torjunnan talous ja ekosysteemipalvelut – Kustannusanalyysi Pohjois-Karjalasta. PTT Työpapereita 165, Helsinki, 54 s.
- Laitinen, L., 1973: Salamanlaskijatoiminta Suomessa 1972. Tutkimuslaskelma No 43, Ilmatieteen laitos, Helsinki, 14 s.
- Larjavaara M., Pennanen J. ja Tuomi T.J., 2005. Lightning that ignites forest fires in Finland, *Agr. Forest Meteorol.*, 132, 171–180.
- Lehtonen, I., Ruosteenoja, K., Venäläinen, A. ja Gregow, H., 2014. The projected 21st century forest-fire risk in Finland under different greenhouse gas scenarios, *Boreal Environ. Res.*, 19, 127–139.
- Lehtonen, I., Venäläinen, A., Kämäräinen, M., Peltola, H. ja Gregow, H., 2016. Risk of large-scale forest fires in boreal forests in Finland under changing climate, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 16, 239–253.
- Länsstyrelsen, Västmanlands län, 2015. Skogsbranden i Västmanland 2014. En dokumentation utgiven av Länsstyrelsen i Västmanlands län (tredje tryckningen juli 2015), 31 s.
- Lindberg, H., Heikkilä, T.V. ja Vanha-Majamaa, I. 2011. Suomen metsien paloainekset – kohti parempaa tulen hallintaa, Metla, Vantaa, 104 s.
- Mäkelä, H., Laapas, M. ja Venäläinen, A., 2012. Long-term temporal changes in the occurrence of high forest fire danger in Finland, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 2591–2601.

- Mäkelä, H., Venäläinen, A., Jylhä, K., Lehtonen, I. ja Gregow, H., 2014. Probabilistic projections of climatological forest fire danger in Finland, *Clim. Res.*, 60, 73–85.
- Mäkelä, J.S., Karvinen, E., Porjo, N., Mäkelä, A. ja Tuomi, T., 2009: Attachment of natural lightning flashes to trees: preliminary statistical characteristics, *J. Lightning Res.*, 1, 9–21.
- Pelastustoimi, 2015. Pelastustoimen Taskutilasto 2010–2014, Pelastusopiston julkaisu, D-sarja: 2/2015, 33 sivua.
- Poli, P., Hersbach, H., Tan, D., Dee, D., Thépaut, J.-N., Simmons, A., Peubey, C., Laloyaux, P., Komori, T., Berrisford, P., Dragani, R., Trémolet, Y., Hólm, E., Bonavita, M., Isaksen L. ja Fisher, M., 2015. The data assimilation system and initial performance evaluation of the ECMWF pilot reanalysis of the 20th-century assimilating surface observations only (ERA-20C). ERA Report Series No. 14, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Shinfield Park, Reading, RG2 9AX, England, 59 s.
- Saku, S., Solantie, R., Jylhä, K., Venäläinen, A. ja Valta, H., 2011. The spatial variation of extreme temperatures in Finland (in Finnish, English Abstract), *Finnish Meteorological Institute Reports 2011:1*, 92 s.
- Sellers, W.D., 1965. *Physical climatology*. The University of Chicago press. 272 sivua.
- Thompson, N., Barrie, I. and Ayles, M., 1981. The Meteorological Office rainfall and evaporation calculation system. MORECS (July 1981). Hydrological memorandum, 45, 69 sivua.
- Tuomi, T.J. ja Mäkelä, A., 2009. Flash cells in thunderstorms. In *Lightning: Principles, Instruments and Applications*, Springer, 509–520. Suomalaisen Kirjallisuuden Seura, Helsinki.
- Uppala, S., 1978. Extreme Distribution Functions for Daily and Monthly Precipitation in Finland. *Geophysica*, 15(1), 17–39.
- Vajda, A., Venäläinen, A., Suomi, I., Junila, P. ja Mäkelä, H., 2014. Assessment of forest fire danger in a boreal forest environment: description and evaluation of the operational system applied in Finland, *Meteorol. Appl.*, 21, 879–887.
- van Wagner C.E., 1987. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Canadian Forestry Service – Forestry Technical Report 35, Ottawa. 37 s.
- Venäläinen, A., 1986. Potentiaalisen haihdunnan ennustusmenetelmä. *Ilmatieteen laitoksen Meteorologisia julkaisuja 2*, 45 sivua.
- Venäläinen, A., Saku, S., Kilpeläinen, T., Jylhä, K., Tuomenvirta, H., Vajda, A., Ruosteenoja, K. ja Räisänen, J., 2007. Sään ääri-ilmiöistä Suomessa (Aspects about climate extremes in Finland, in Finnish, English Abstract). *Finnish Meteorological Institute, Reports 2007:4*, 81 s.
- Venäläinen, A., Korhonen, N., Koutsias, N., Xystrakis, F., Urbietta, I.R. ja Moreno, J.M., 2014. Temporal variations and change in forest fire danger in Europe for 1960–2012, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 1477–1490.
- Voldoire, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Méliá, D., Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., Valcke, S., Beau, I., Alias, A., Chevallier, M., Déqué, M., Deshayes, J., Douville, H., Fernandez, E., Madec, G., Maisonnave, E., Moine, M.-P., Planton, S., Saint-Martin, D., Szopa, S., Tyteca, S., Alkama, R., Belamari, S., Braun, A., Coquart, L. and Chauvin, F., 2013. The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation. *Climate Dynamics* 40, 2091–2121.
- von Salzen, K., Scinocca, J.F., McFarlane, N.A., Li, J., Cole, J.N.S., Plummer, D., Versegny, D., Reader, M.C., Ma, X., Lazare, M. ja Solheim, L., 2013. The Canadian fourth generation atmospheric global climate model (CanAM4). Part I: representation of physical processes, *Atmos. Ocean* 51, 104–125.

Watanabe, M., Suzuki, T., O'ishi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emori, S., Takemura, T., Chikira, M., Ogura, T., Sekiguchi, M., Takata, K., Yamazaki, D., Yokohata, T., Nozawa, T., Hasumi, H., Tatebe, H. ja Kimoto, M., 2010. Improved climate simulation by MIROC5: mean states, variability, and climate sensitivity, *J. Climate* 23, 6312–6335.



ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

ILMATIETEEN LAITOS

Erik Palménin aukio 1

00560 Helsinki

puh. 029 539 1000

WWW.ILMATIETEENLAITOS.FI

ILMATIETEEN LAITOS

RAPORTTEJA 2016:3

ISBN 978-951-697-885-0

ISBN 978-951-697-884-3 (pdf)

ISSN 0782-6079

Erweko

Helsinki 2016

