

# MAASTOPALOT JA PALON LEVIÄMISEN DYNAMIIKKA

Hillberg Antti

Opinnäytetyö  
Metsätalouden koulutusohjelma  
Metsätalousinsinööri (AMK)

2020

Metsätalouden koulutusohjelma  
Metsätalousinsinööri (AMK)

---

<b>Tekijä</b>	Antti Hillberg	<b>Vuosi</b>	2020
<b>Ohjaaja</b>	Jussi Soppela		
<b>Toimeksiantaja</b>	Lapin ammattikorkeakoulu		
<b>Työn nimi</b>	Maastopalo ja palon leviämisen dynamiikka		
<b>Sivumäärä</b>	69		

---

Suomessa maastopaloja esiintyy vuosittain. Metsäpalotilastojen ja palojen esiintymistiheystiedon perusteella on arvioitu, että Suomen jokainen metsikkökuvio on altistunut maastopaloille viimeisten 400–500 vuoden aikana. Tämän kirjallisuuskatsauksena toteutettavan opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää maastopalojen syntymiseen ja leviämiseen vaikuttavia tekijöitä. Työssä esitellään myös maastopalojen mallintamisessa käytettäviä menetelmiä.

Opinnäytetyön toimeksiantaja on Lapin ammattikorkeakoulu. Toimeksiantajan tavoite tutkimukselle oli saada valmiiksi koottu tietokokonaisuus maastopaloista ja niiden leviämiseen vaikuttavista tekijöistä sekä maastopalojen mallintamisesta. Toimeksiantaja voi käyttää työn tuloksena koottua materiaalikokonaisuutta tutkimus-, kehitys- ja innovaatio toiminnassa, opetuksessa ja hankehauissa taustamateriaalina.

Tutkimus osoittaa, että pääasiallisin maastopalojen syntymisen aiheuttaja on ihminen ja ihmisen toiminta. Huolimaton ja välinpitämätön tulen käsittely aiheuttaa Suomessa vuosittain satojen hehtaarien maastopaloit. Maastopalon sytyttää salama niillä alueilla missä ihmisvaikutusta ei ole. Maastopalo voi levitä palavan aineksen synnyttämän lämmön vaikutuksesta lämmön siirtymisenä, lämpösäteilynä, lämmön johtumisena tai massakulkeutumisenä. Maastopalon käyttäytymiseen ja leviämiseen vaikuttavia tekijöitä ovat palava aines, topografia ja sää. Ilmastonmuutoksen vaikutukset voivat muuttaa maastopalojen esiintymistiheyttä tulevaisuudessa. Suomen ilmasto ei suojaa suurilta maastopaloilta.

Maastopalojen leviämistä ennustavia tietokoneohjelmia on kehitetty maissa, joissa maastopaloit ovat jatkuva ongelma. Opinnäytetyössä esitellään pääasialliset leviämisen mallintamiseen käytettävät menetelmät ja esimerkkiohjelmat. Ohjelmia on koekäytetty myös Suomessa, mutta nykyisessä muodossaan ne eivät ilman muokkausta sovellu maastopalojen leviämisen ennustamiseen hätätilanteissa.

Degree Programme in Forestry  
Forestry Engineer

---

<b>Author</b>	Antti Hillberg	Year	2020
<b>Supervisor</b>	Jussi Soppela		
<b>Commissioned by</b>	Lapland University of Applied Sciences		
<b>Subject of thesis</b>	Wildfires and propagation dynamics of fire		
<b>Number of pages</b>	69		

---

Wildfires occur annually in Finland. According to the forest fire statistics and forest fire frequency statistics, every forest stand in Finland has been burned by wildfires at least once during the past 400–500 years. The aim of this thesis, which is a literature review, is to find out which factors affect origin and propagation of wildfires. This thesis will introduce example methods and computer programs which are used to model wildfire propagation.

The thesis is commissioned by Lapland University of Applied Sciences. The commissioner's goal for the study was to gather an information package about wildfire origin, propagation factors and wildfire modelling. The commissioner can use this study in research, development and innovation use as well as education purposes and project applications.

According to the study the major cause of wildfire ignition is human and human activity. The careless and regardless attitude of use of fire causes wildfires on hundreds of hectares every year in Finland. In areas where there is no human influence, lightning starts wildfires. Wildfires can spread by convection, heat radiation, conduction, or mass transportation. The factors that influence wildfire behavior and propagation are burning material, topography, and weather. The impact of climate change might affect the frequency of wildfires in the future. Finland's climate cannot protect us from danger of larger wildfires.

Wildfires are a continuous problem in some countries, and therefore wildfire propagation programs have been developed. This study introduces the main methods of wildfire propagation modelling and example programs. Some of these programs have been tested in Finland, but they are not suitable in emergency situations without customizing.

Key words

forest fire, wildfire, wildfire propagation

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
1.1	Opinnäytetyön aihe .....	6
1.2	Opinnäytetyön toteutus .....	7
2	MAASTOPALOT BOREAALISELLA HAVUMETSÄVYÖHYKKEELLÄ .....	10
2.1	Boreaalinen havumetsävyöhyke .....	10
2.2	Maastopalot .....	12
2.3	Maastopalot Suomessa .....	14
2.3.1	Kaskeaminen ja kulutus .....	14
2.3.2	Palojen määrät ja laajuus .....	15
2.3.3	Suomen maastopalojen aiheuttajat ja syttymissyöt .....	17
2.4	Maastopalot Ruotsissa .....	21
2.5	Maastopalot Venäjällä .....	23
3	PALOMUODOT .....	26
3.1	Palomuotojen luokittelu .....	26
3.2	Maapalo .....	27
3.3	Pintapalo .....	27
3.4	Latvapalo .....	29
3.5	Soihtupalo .....	30
3.6	Heitepalo .....	31
4	MAASTOPALON LEVIÄMINEN .....	32
4.1	Maastopalon käyttäytymiseen ja leviämiseen vaikuttavat tekijät .....	32
4.1.1	Palava aines eli polttoaine .....	32
4.1.2	Topografia .....	34
4.1.3	Sää .....	36
4.2	Maastopalon leviämistavat .....	38
4.3	Lämmön siirtymistavat .....	39
5	ILMASTONMUUTOS JA MAASTOPALOT .....	41
5.1	Ilmastonmuutoksen vaikutukset säähän ja ilmastoon .....	41
5.2	Ilmastonmuutos ja maastopalot Suomessa .....	42
5.3	Ilmastonmuutos ja maastopalot Ruotsissa .....	43

5.4	Ilmastonmuutos ja maastopalot Venäjällä.....	44
6	MAASTOPALOJEN MALLINTAMINEN .....	45
6.1	Mallinnusmenetelmät .....	45
6.2	Maastopalojen leviämisen mallintamiseen tarvittavat tiedot.....	47
6.3	Leviämisen mallintamismenetelmät .....	48
6.3.1	Soluautomaatti .....	49
6.3.2	Vektorietenemismalli .....	50
6.4	Maastopalon mallintamisen esimerkkiohjelmat.....	52
6.4.1	Prometheus .....	53
6.4.2	Burn-P3 .....	55
6.4.3	Cell2Fire.....	56
6.4.4	BehavePlus .....	57
6.4.5	MASIFIRE .....	58
6.5	Pelastusviranomaisten näkökulma mallinnusohjelmiin .....	58
7	POHDINTA.....	60
	LÄHTEET.....	64

## 1 JOHDANTO

### 1.1 Opinnäytetyön aihe

Ajatus opinnäytetyön aiheesta lähti lukiessani vuoden 2020 alussa Helsingin Sanomien mielipideosaston kirjoitusta, joka käsitteli metsäpalojen riskiä valtion metsissä. Yleinen keskustelu valtion metsien käsittelyistä on saanut monet eri tahot aktivoitumaan ja tuomaan esille omat näkemyksensä siitä, miten valtion metsiä tulisi käsitellä. Lakialoite avohakkuiden lopettamiseksi valtion mailla lähetettiin eduskuntaan 22.10.2019 (Oikeusministeriö 2018). Jos lakialoite hyväksytään, valtion metsien käsittelymenetelmissä avohakkuu ei ole enää käytettävissä. Tämä puolestaan tarkoittaisi sitä, että valtion metsien käsittelyssä siirryttäisiin jatkuvan kasvatuksen menetelmiin. Mielipideosaston kirjoituksen mukaan metsäpalot ovat riskitekijä jatkuvassa kasvatuksessa, jolloin samaan aikaan kasvatettavat eri kasvuvaiheissa olevat puut syttyvät helposti (Hannelius 2020).

Alkuperäinen ajatukseni opinnäytetyöni aiheeksi oli maastopalot erikikäisrakenteisissa metsissä, joka osoittautui tutkitun tiedon puutteen vuoksi vaikealta toteuttaa. Käytännössä suoritettava tutkimus olisi erittäin kallis ja aikaa vievä projekti. Alkuperäisestä ajatuksesta poiketen opinnäytetyö käsittelee maastopaloja ja palojen leviämisen dynamiikkaa. Maastopalot ovat aiheuttaneet suuria vahinkoja Venäjällä ja vuonna 2018 Ruotsin laajat maastopalot aiheuttivat suuren luokan sammutusoperaatioita (Karvinen, Väkky, Gerasimov & Dobrovolsky 2011, 43; Myndigheten för samhällskydd och beredskap 2018). Kesällä 2020 Muhoksella roihunnut maastopalo poltti yli 250 hehtaarin maa-alueen (Blom 2020). Suomi tunnetaan metsistään, ja naapurimaiden maastopalot ovat herättäneet ajatuksia siitä, olisivatko tällaiset maastopalot mahdollisia myös Suomessa. Metsäpalojen määrät ovat lisääntyneet huomattavasti 1950-luvulta vuoteen 2020 tultaessa (Lindberg 2013, 8).

Aiheen ajankohtaisuutta perustelee myös ilmastonmuutoksen vaikutus metsäpalariskeihin. Tutkimusten mukaan riski metsäpaloihin kasvaa tulevan vuosisadan aikana jonkin verran. Maan pintakerrosten tehostunut kuivuminen on suora vaikutus lisääntyvästä haihdunnasta, jota lämpötilan kohoaminen lähes

yksinomaan aiheuttaa. (Ilmatieteen laitos 2014.) Ilmaston lämpeneminen on maailmanlaajuinen ongelma. Suuret maastopaloit vaikuttavat osaltaan ilmaston lämpenemiseen ja hiilidioksidipäästöihin ilmakehässä.

Tutkimuksen toinen luku käsittelee maastopaloja ja niiden paloympäristöä sekä palomääriä, palojen syttymistekijöitä ja palohistoriaa työn rajauksen mukaan. Luvussa 3 käsitellään pohjoisen havumetsävyöhykkeen palomuodot ja niiden luokittelu. Neljännessä luvussa käsitellään maastopalon leviämistä ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Ilmaston muutoksen vaikutusta maastopaloihin tutkitaan luvussa 5. Teoriaosan viimeisessä luvussa 6 esitetään maastopalojen mallintamisen menetelmät ja esimerkkiohjelmistot. Luku 7 on pohdinta työn keskeisestä sisällöstä.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Lapin ammattikorkeakoulu. Toimeksiantajan kiinnostus opinnäytetyöhön liittyy aiheen ajankohtaisuuteen sekä Suomen naapurimaissa lähivuosina tapahtuneisiin laajoihin maastopaloihin. Tuhoisia maastopaloja on ollut niin Ruotsissa kuin Venäjälläkin. Lapin ammattikorkeakoulun tutkimus-, kehitys- ja innovaatiotoiminta on tiiviisti kytköksissä opetukseen, ja siihen liittyen opinnäytetyötä voidaan käyttää soveltuvien osien perusopetuksessa ja korkeakouluopetuksessa opetusmateriaalina. Opinnäytetyötä voidaan käyttää tausta-aineistona tutkimus- ja kehityshankkeissa sekä materiaalina hankehauissa.

## 1.2 Opinnäytetyön toteutus

Kirjallisuuskatsauksia on useita erilaisia. Yleisimmin käytetty kirjallisuuskatsauksen tyyppi on kuvaileva kirjallisuuskatsaus. Kuvaileva kirjallisuuskatsaus jaetaan integroivaan ja narratiiviseen kirjallisuuskatsaukseen. Meta-analyysi jaetaan kahteen eri suuntaukseen, määrälliseen tutkimukseen ja laadulliseen tutkimukseen. Yksi kirjallisuuskatsausten tyypeistä on systemaattinen kirjallisuuskatsaus. (Salminen 2011, 6–8, 12.) Tämän opinnäytetyön tutkimusmenetelmänä on käytetty kirjallisuuskatsausta. Systemaattista kirjallisuuskatsausta olen tässä opinnäytetyössä käyttänyt soveltaen. Systemaattisen kirjallisuuskatsauksen vaatimukset eivät täytyneet,

koska hakuja ei ole tehty systemaattisesti arvioiden ja laatua ei arvioitu. Työssä ei ole myöskään käytetty pelkästään tutkimuksiin perustuvaa tietoa.

Kirjallisuuskatsauksella tarkoitetaan yleiskatsausta tieteelliseen kirjallisuuteen (Kontturi 2015, 9). Baumeisterin ja Learyn (1992, 312) mukaan yksi kirjallisuuskatsauksen tavoitteista on kokonaiskuvan rakentaminen tietystä asiakokonaisuudesta. Tutkimus on suoritettu laadullisesti eli kvalitatiivisesti. Laadullisessa tutkimuksessa yhdistyvät aiemmin tehdyt teoriat ja tutkimukset, kokemusperäiset aineistot ja tutkijan omat päätelmät ja ajatukset (Saaranen-Kauppinen & Puusniekka 2006, 5–7). Opinnäytetyö on rajattu koskemaan maastopaloja ja niiden leviämistä boreaalisella havumetsävyöhykkeellä Suomessa, Ruotsissa ja Venäjän Euroopan puoleisissa osissa.

Maastopalot ja palon leviämisen dynamiikka -opinnäytetyö on kirjallisuuskatsaus, jonka tavoitteena on etsiä vastauksia tutkimuskysymyksiin:

- mitkä tekijät vaikuttavat maastopalojen syntymiseen?
- mitkä tekijät vaikuttavat maastopalojen leviämiseen?

Tutkimuskysymysten asettamisen jälkeen aloitin tiedonhaun Lapin korkeakoulukonsernin LUC-kirjastosta. Lapin korkeakoulukirjaston tietoasiantuntijan avulla laajensin hakutermistöä ja hakujen rajauksia. Omaan aiheeseeni liittyviä artikkeleita ja kirjallisuutta löysin Lapin korkeakoulukirjastosta niukasti. Ennen fyysisten kirjastopalveluiden sulkemista ehdin tutustua Arktisen kirjaston kokoelmiin ja löysin työhöni sopivaa aineistoa.

Opinnäytetyön aineiston hankinnassa on käytetty useita eri tietokantoja, portaaleja, yhteisöpalveluja ja lähteitä. Aineistona työssä ovat olleet aiheeseen liittyvät kirjat, tutkimukset, väitöskirjat, artikkelit, käyttöoppaat, lait, pro gradu - tutkielma, erilaiset sähköiset lähteet ja sähköpostit. Aiheeseen liittyviä linkkejä ja artikkeleita olen saanut myös suoraan tutkijoilta. Pääasialliset työssä tiedonhakuun käytetyt tietokannat, portaalit tai yhteisöpalvelut ovat ResearchGate, ProQuest One Academic, ScienceDirect, Google Scholar,



Academia.edu, Luc-Finna, Luonnonvarakeskuksen Jukuri, Silva Fennica ja Helda.

Hyväksyin alkuperäisten tutkimusten kieleksi suomen kielen, englannin- ja ruotsin kielet. Suuressa osassa työssäni käyttämistä aineistoista kielenä on Englanti. Tutkimustietoa esimerkiksi maastopalojen mallintamisesta ja maastopalojen leviämisestä löytyi runsaasti Kanadasta ja Pohjois-Amerikasta. Suomessa tehdyt tutkimukset näyttivät keskittyvän maastopalojen syttymispotentiaaliin, sääolojen vaikutukseen maastopaloissa ja palavaan ainekseen. Suomessa tehdyt tutkimukset maastopaloista keskittyivät myös palojen vaikutuksista luonnon monimuotoisuuteen. Tutkimustietoa maastopalojen leviämisestä ja sen mallintamisesta löytyy maista, joissa maastopalot ovat jatkuva ongelma.

Olen hyväksynyt aineistoon vanhojakin teoksia. Eino Saaren (1923) tilastollinen tutkimus on historian tiedon lähteenä edelleen paikkansa pitävä. Maastopaloa mallintavien ohjelmien taustallakin käytettäviä matemaattisia malleja on kehitetty jo kymmenien vuosien ajan. Samoja matemaattisia malleja käytetään edelleen. Hankaluuksia aiheutti vanhojen aineistojen saaminen. Tiedon hakeminen oli paikoin hidasta ja vaivalloista. Jos en löytänyt alkuperäisteosta, päätin olla käyttämättä kyseistä lähdettä. Merkittävää apua sain kustannustoimittajalta, jonka avulla sain lukuoikeuden muutamaan alkuperäisteokseen.

Lähteiden luotettavuutta arvioin aineiston tekijöiden ja julkaisijoiden perusteella. Tiedonhakuun käytetyt tietokannat, portaalit tai yhteisöpalvelut ResearchGate, ProQuest One Academic, ScienceDirect, Google Scholar, Academia.edu, Luc-Finna, Luonnonvarakeskuksen Jukuri, Silva Fennica ja Helda ovat yleisesti tunnettuja tieteellisen materiaalin tuottajia ja julkaisijoita. Osa käyttämistäni lähteistä ovat myös vertaisarvioituja, joten katsoin niiden olevan tietolähteinä luotettavia. Pieniä virheitä löytyy myös tällaisista materiaaleista esimerkiksi tiivistelmien ja abstraktien osalta. Varsinaisia ristiriitaisuuksia en aineistojen välillä havainnut.

## 2 MAASTOPALOT BOREAALISELLA HAVUMETSÄVYÖHYKKEELLÄ

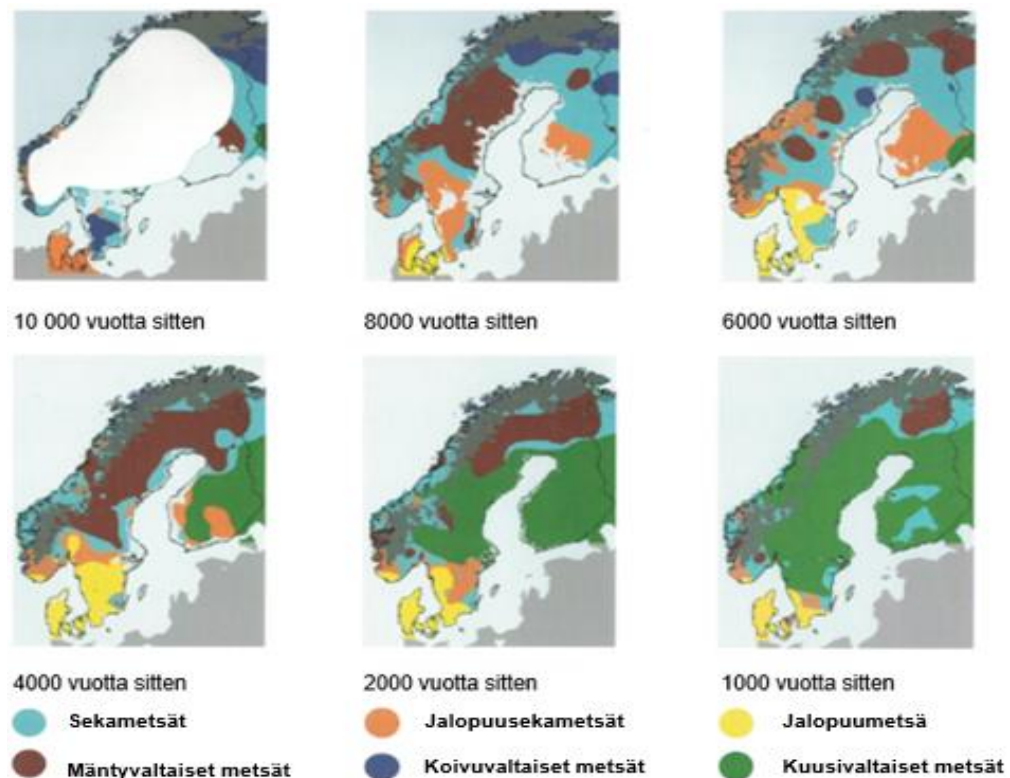
### 2.1 Boreaalinen havumetsävyöhyke

Maapallon eloyhteisöistä nuorin on boreaalinen havumetsävyöhyke (Mönkkönen 2004, 32). Eloyhteisöllä eli biomilla tarkoitetaan kokonaisuuksia, jotka muodostuvat laajoista ekosysteemeistä. Biomien rajautuminen perustuu ympäristötekijöiden ja eliöstön samankaltaisuuteen koko eloyhteisön alueella. Biomin rajauksessa kasvillisuudella on suuri merkitys. (Heikkinen 2020.) Boreaalinen havumetsävyöhyke on kehittynyt maapallon viilentymisen seurauksena viimeisen 20 miljoonan vuoden aikana. Subtrooppiset ja trooppiset metsät kasvoivat Kanadan arktisilla saarilla ja Huippuvuorilla saakka 30 miljoonaa vuotta sitten. (Mönkkönen 2004, 32.) Boreaaliseen eli pohjoiseen havumetsävyöhykkeeseen kuuluvat maantieteellisen sijaintinsa perusteella Suomi, Ruotsi, Norja, Kanada, Yhdysvallat ja Venäjä (Maa- ja metsätalousministeriö 2018). Suuret maat ja niiden laajat maa-alueet sisältävät muitakin kasvillisuusvyöhykkeitä boreaalisen havumetsävyöhykkeen lisäksi.

Boreaalinen havumetsävyöhyke jaetaan neljään alavyöhykkeeseen, joita ovat pohjoisboreaalinen, keskiboreaalinen, eteläboreaalinen ja hemiboreaalinen vyöhyke. Suomen maantieteellisen sijainnin vuoksi maastamme löytyy pohjois-, keski- ja eteläboreaalinen vyöhyke. (Mönkkönen 2004, 36.) Metsävyöhykkeistä lajistollisesti vähälukuisimpana pidetään boreaalista havumetsää. Euroopassa jääkaudet ovat vaikuttaneet metsiin, metsien kasvillisuuteen ja eläinlajien runsauteen kaikista voimakkaimmin. Metsä katosi Euroopasta lähes kokonaan jääkausien aikana. Trooppisiin sademetsiin ja lauhkean vyöhykkeen lehtimetsiin verrattuna boreaalisen havumetsän lajisto on kokonaisuudessaan vähälukuisempi. (Mönkkönen 2004, 32–33.) Biomin eliöstön samankaltaisuudesta huolimatta lajien kirjo voi vaihdella paikallisesti kovastikin. Yhteistä lajistoille kuitenkin on, että ne ovat sopeutuneet samankaltaisiin olosuhteisiin, esimerkiksi ankaraan talveen. (Heikkinen 2020.) Boreaalisella havumetsävyöhykkeellä ympäristöolosuhteet ja niiden vaihtelut ovat äärimmäisiä. Lämpötilan vaihtelu ilmassa voi olla kymmeniä asteita. Kanadassa

ja Siperiassa mantereisten alueiden lämpötilavaihtelut voivat olla jopa sata astetta. (Keto-Tokoi & Kuuluvainen 2011, 97.)

Boreaalisen havumetsän kehitys on lähtenyt liikkeelle primäärisukcessiona. Jääkauden jääkerroksen sulamisen jälkeen paljaalle kivennäismaalle levittäytyivät ensimmäisenä kylmässä ilmastossa menestyvät kasvit ja eliöt. Tuulten tuomat levien, jäkälien ja sammalten itiöt kehittyivät ja alkoivat kerryttämään maaperään typpeä sinileväsymbioosin avulla. Tärkeää ravinnetta, typpeä, oli aiemmin niukasti. Eläinten turkeissa, lintujen ulosteissa ja tuulten mukana kulkeutui maahan myöhemmin siemeniä, joista kasvoivat ensimmäiset matalat kasvit, esimerkiksi lapinvuokko. Ruusut, vadelmat, pajut, katajat ja pensaat olivat puuvartisista kasveista ensimmäisiä. Koivu oli kevytsiemenisenä puista ensimmäinen. Pihlajat ja lepät levisivät lintujen avulla, ja pian näiden jälkeen seurasi mänty. Viimeisen 10 000 vuoden aikana Suomen metsissä tavattavat kasvilajit ovat saapuneet eri aikoina ja eri reittejä pitkin (Kuvio 1). (Keto-Tokoi & Kuuluvainen 2011, 101.)



Kuvio 1. Fennoskandian alueen jääkauden jälkeinen metsäkasvillisuuden kehittyminen siitepölyaineistoihin perustuvan rekonstruktion pohjalta (Keto-Tokoi & Kuuluvainen 2011, 102)

## 2.2 Maastopalot

Rakentamattomalla alueella tapahtuvaa paloa kutsutaan maastopaloksi. Metsäpaloksi kutsutaan maastopaloa, jossa palaa metsää. (Heikkilä, Lindberg & Vanha-Majamaa 2011, 90–91.) Suomessa on jo noin 70 vuoden ajan ollut käytössä metsäluokitus, jossa luokittelu perustuu puuston kiertoaikana tapahtuvaan kasvuun. Metsällä tarkoitetaan yleisesti metsä- ja kitumaita. Hehtaarikohtainen puuston kasvu metsämaalla on vähintään yksi kuutiometri vuodessa. Kitumaan kasvu on alle yksi kuutiometri, mutta yli 0,1 kuutiometriä hehtaaria kohden vuodessa. Joutomaan kasvu on alle 0,1 kuutiometriä vuodessa hehtaarilla. (Metsäntutkimuslaitos 2012.) Metsämaan luokittelu koskee myös alueita, joissa vuotuinen puun kasvu hehtaarikohtaisesti on hyvin vähäistä. Tällaisella alueella tapahtuvaa paloa voitaneen kutsua metsäpalon lisäksi myös maastopaloksi.

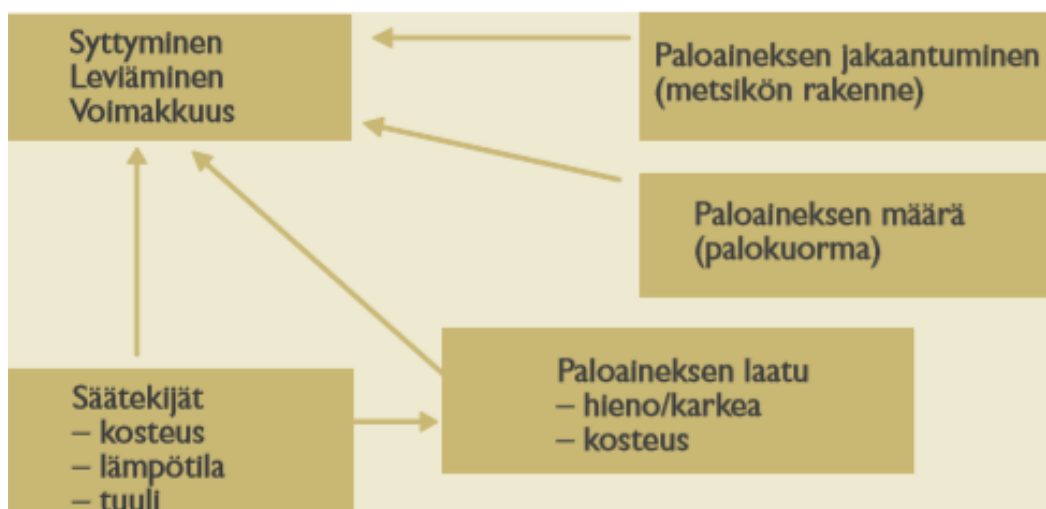
Kansainvälisen terminologian mukaan kaikki palot ovat maastopaloja, kulotukset mukaan lukien. Ei-toivottua ja hallitsematonta paloa kutsutaan kansainvälisesti termillä wildfire. Terminologia maastopalon ja metsäpalon välillä on hieman epäselvä. Maastopaloiksi ei suomenkielisessä terminologiassa lueta kuuluvaksi kulotuksia, koska wildfire-termin mukaan kyse on hallitsemattomasta ja toivomatta tapahtuvasta palotapahtumasta. Metsäpaloiksi luetaan aukeilla aloilla, taimikoissa, nuorissa ja varttuneissa metsissä tapahtuvat palot. (Heikkilä ym. 2011, 90–91.) Termipankki (2020) määrittelee kulotuksen maaston tarkoituksellisen ja hallittuna polttamisenä. Pelastustoimessa maastopaloiksi on luokiteltu puistopalot, kaatopaikkapalot, turvetuotantoaluepalot, ruohikkopalot ja metsäpalot (PRONTO 2015, 19). Yleisesti voidaan todeta kaikkien metsäpalojen olevan maastopaloja. Kuitenkaan kaikki maastopalot eivät ole metsäpaloja.

Maastopaloihin liittyvät samat lainalaisuudet kuin muuhunkin palamiseen. Palamistapahtuman edellytyksenä ovat palava aines, happi ja lämpö. Jo osa maaston palavista aineksista voi aiheuttaa maastopalon. Paloaineksen saavuttaessa riittävän lämpötilan, syntynyt lämpö voi sytyttää muun lähellä olevan palavan aineksen. Palava aines maassa ja metsässä koostuu muun muassa kangasturpeesta, sammalista ja jäkälistä, varvuista, kuolleista lehdistä,

risuista ja kävyistä sekä elävistä ja kuolleista puista ja pensaista. (Heikkilä ym. 1999, 44.)

Maastopalo Suomessa vaatii aina ulkopuolisen syttymistä edistävää lisäenergiaa sisältävän lähteen eli sytytyslähteen. Palaminen käynnistyy, kun lisäenergia kohottaa pistemäisesti lämpötilan riittävän korkeaksi. Suomen metsien paloaineksilla itsesyttymistä ei tapahdu. Eksotermisen reaktion kautta itsesyttymisen on kuitenkin mahdollista. Eksotermisessä reaktiossa palava aines syttyy ilman ulkoista sytyttämistä. Eksotermisen reaktion sytyttämien palojen aiheuttamia paloja voi syntyä esimerkiksi turpeentuotantoalueilla aumoissa. (Heikkilä ym. 2011, 17.)

Ulkoiset olosuhteet, palavan aineksen ominaisuudet sekä sytytyslähde muodostavat kokonaisuuden, joka aiheuttaa palon syttymisen, laadun ja kehittymisen (Kuvio 2). Sää on ulkoisista olosuhteista keskeisessä asemassa. (Heikkilä ym. 2011, 17.) Palaminen loppuu, kun yksi tai useampi palon edellyttämistä tekijöistä puuttuu. Hapen, lämmön tai palavan aineksen poistaminen palotapahtumasta aiheuttaa palon sammumisen. Yhtä aikaa voidaan vaikuttaa useampaan palon tekijään. (Heikkilä ym. 1999, 44.)



Kuvio 2. Metsäpalon syttymis- ja palamistapahtumaa säätelevät tekijät (Heikkilä ym. 2011, 17)

## 2.3 Maastopalot Suomessa

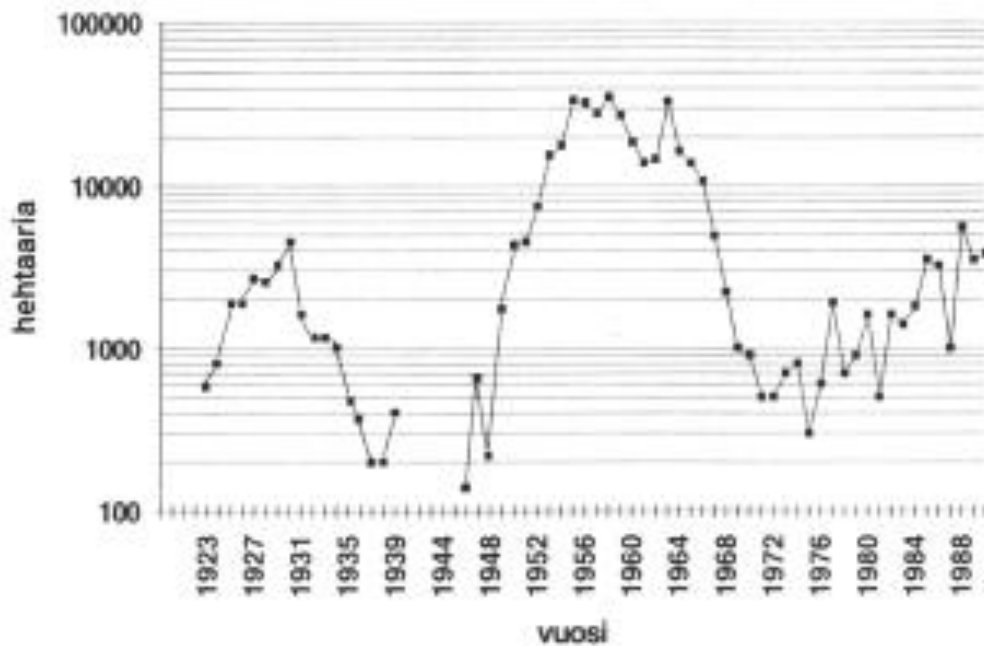
Metsäpalotilastojen ja palojen esiintymistiheystiedon perusteella on arvioitu, että Suomen jokainen metsikkökuvio on altistunut maastopaloille viimeisten 400–500 vuoden aikana (Parviainen 1996, 56, 63). Tuli on ollut aina osa suomalaista metsäluontoa, mutta luonnollisten maasto- ja metsäpalojen tulten vaikutukset ovat metsistämme lähes kokonaan hävinneet (Lemberg & Puttonen 2002, 7–8).

### 2.3.1 Kaskeaminen ja kulotus

Suomessa vuosisatoja harjoitettuun kaskiviljelyyn käytettiin 50–75 prosenttia maamme metsistä. Kaskiviljelyä seurannutta kulotusta käytettiin 2–3 prosenttiin Suomen metsistä. (Parviainen 1996, 63.) Palot ovat olleet boreaalisen havumetsän kehittymisen kannalta olennainen osa. Ihmisen vaikutus elinympäristönsä palamiseen oli 1700–1800-luvuilla suuri, jolloin kaskitalous mahdollisti maaseutuväestön toimeentulon. Kaskeamista pidettiin jo 1600-luvulla metsävarantoja kadottavana toimenpiteenä. Kaskenpoltosta tuli luvanvaraista lain ja asetuksen nojalla vuonna 1734. Savon ja Karjalan poikkeusasema antoi alueille kaskeamisen mahdollisuuden vuoteen 1886 saakka. Kaskeamista tapahtui vielä tämän jälkeenkin, ja vuonna 1967 poistettiin kaskenpolttoa koskevat määräykset. (Parviainen 1993,11.)

Kaskeamista seurannut kulotus oli huonokuntoisten metsien uudistamiseen käytetty menetelmä, jossa jätepuuta, hakkuutähteitä ja hajanaisesti leviteltyjä oksia poltettiin. Kulotusten vuosittainen määrä 1920-luvulla oli noin 8000 hehtaaria, 1930-luvulle tultaessa kulotusten määrä väheni joihinkin satoihin hehtaareihin vuodessa. Toisen maailmansodan jälkeen kulotus lisääntyi, etenkin pohjoisten paksusammalkuusikoiden uudistamisessa kulotusta käytettiin useasti. Mekaanisen maanmuokkauksen yleistymisen myötä kulotukset vähenivät 500–1000 hehtaariin vuodessa. Kulotuksista aiheutuneet hallitsemattomat palot ovat olleet yksi syy kulotuksen suosion vähenemiseen. Sääolosuhteet vaikuttavat olennaisesti kulotukseen ja sitä kautta toimenpiteen organisointiin ja järjestelyihin. Osaltaan myös nämä tekijät ovat vaikuttaneet kulotusten vähenemiseen, menetelmän kalleuden lisäksi. (Parviainen 1993,13.)

Kulotuksen jäljittelemät, luonnolliseen kiertokulkuun kuuluvat aukkovaiheet eivät ole vaikutukseltaan tarkalleen samanlaisia kuin luonnolliset maastopalot, mutta näitä toimenpiteitä tarvitaan ravinnetasapainon ja metsän tuottavuuden ylläpitämiseksi (Parviainen 1996, 63). Metsämaan hoitokeinona kulotusta tulisi lisätä. Lähinnä teknisten tekijöiden takia kulotus ei kuitenkaan ole kasvanut (Kuvio 3) samoihin määriin kuin esimerkiksi 1950–1960-luvuilla. (Parviainen 1993, 13–14.)

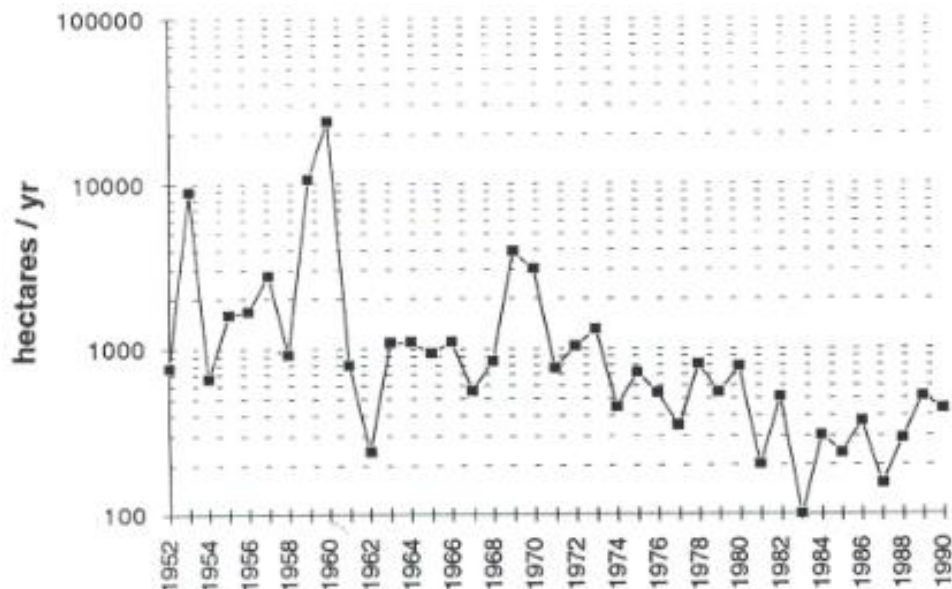


Kuvio 3. Kulotuksen vuosittaiset määrät 1920–1990 (Parviainen 1996, 62)

### 2.3.2 Palojen määrät ja laajuus

Maasto- ja metsäpalojen määrä Suomessa on lähes kolminkertaistunut 1950-luvulta 2010-luvulle tultaessa. Palojen määrällinen lisääntyminen ei ole kuitenkaan vaikuttanut palaneiden alueiden pinta-aloihin samassa suhteessa. Paloala 1950-luvulla oli keskimäärin 5760 hehtaaria vuodessa. Paloala 2000-luvulla on ollut vuodessa keskimäärin 643 hehtaaria. Palokohtainen pinta-ala oli 1950-luvulla 11,2 hehtaaria, 2000-luvulla palokohtainen pinta-ala on ollut 0,4 hehtaaria. (Lindberg 2013, 8.) Paloja on 2000-luvulla määrällisesti enemmän, mutta ne ovat laajuudeltaan hyvin pienialaisia.

Suuret maastopalot ovat olleet Suomessa toistaiseksi harvinaisia (Heikkilä ym. 1999, 7). Vanhin tilastotieto paloista ajoittuu yli 130 vuoden päähän, jolloin hallitsemattomat ja ei-toivotut palot olivat hyvin yleisiä kruunun mailla. Pahimpina vuosina 1868, 1888 ja 1894 maastossa paloi 50 000–70 000 hehtaaria maata. (Saari 1923, 45–47; Parviainen 1996, 55.) Tunnetuimpia maassamme tapahtuneista maastopaloista (Kuvio 4) lienee Sallassa vuonna 1960 roihunnut Tuntsan palo, jossa palot polttivat metsää ja maastoa 120 000 hehtaarin alalta sekä Venäjällä että Suomessa. Suomessa maastoa paloi noin 20 000 hehtaarin alalta. (Peltonen ym. 2003, 10; Keto-Tokoi & Kuuluvainen 2011, 130.) Vuonna 1959 Isojoen-Honkajoen palo tuhosi maastoa noin 1700 hehtaarin alalta. Kalajoen ja Limingan palot aiheuttivat vahinkoja yhteensä noin 2100 hehtaarin alueella. Lieksan palossa 1992 paloi 150 hehtaarin maa-ala ja 1997 Laihian ja Tammelan palot polttivat yhteensä noin 400 hehtaarin alueen. (Peltonen ym. 2003, 10.) Kesällä 2020 Muhoksella roihunnut maastopalo poltti 265 hehtaarin alueen, joka on toistaiseksi 2000-luvun suurin maastopalo Suomessa (Blom 2020).



Kuvio 4. Maastopalojen vuosittain polttamat metsäalat Suomessa ajanjaksolla 1952–1990 (Parviainen 1996, 57)



### 2.3.3 Suomen maastopalojen aiheuttajat ja syttymissyöt

Maaston syttymisen aiheuttajia on monia. Ihmisen sytyttämät palot ovat kaikista yleisimpiä. Ihmisten huolimattomasta toiminnasta paloista syntyy 65–70 prosenttia. (Parviainen 1996, 55; Peltonen ym. 2003, 9.) Saari (1923, 11) kirjoittaa tilastollisessa selvityksessään ihmisen aiheuttamiksi syiksi tupakanpolton, nuotio- tai keittotulen, muun varomattoman tulen käytön ja tahallisen sytytyksen. Ruotsissa paloihin johtaneita ihmisen toimia ovat olleet risunpoltto, kaskeaminen ja viljelys, tupakoitsijat ja huvimatkaillijat sekä varomattomat metsätyömiehet, kalastajat, uittomiehet ja paimenet. Murhapoltot, ammunta ja kiven räjäyttäminenkin ovat myötävaikuttaneet palojen syttymiseen. (Saari 1923, 18.) Ihmisen varomaton tulenkäyttö lienee kuitenkin yleisin syy maastopalojen syttymiseen.

Pelastusopisto julkaisee viiden vuoden välein pelastustoimen taskutilastoja, josta maastopalojen määrän vaihtelevuutta on helppo vertailla. Pelastustoimen taskutilastoja 2008–2012 (Taulukko 1) ja 2014–2018 (Taulukko 2) vertailtaessa on helposti havaittavissa vaihtelu, jota maastopalojen esiintymisessä ilmenee.

Taulukko 1. Maastopalot 2008–2012 (Pelastusopisto 2013, 17)

<b>MAASTOPALOT</b>					
	2008	2009	2010	2011	2012
Metsäpalo	1456	1242	1412	1262	440
Muu maastopalo	1784	1599	1688	1609	631
Yhteensä	3240	2841	3100	2871	1071

Maastopalojen kokonaismäärä on kasvanut vuosien 2008–2012 ajanjaksosta lähes tuhannella palolla tultaessa ajanjaksolle 2014–2018. Aiemman ajanjakson maastopalojen määrä oli 13123 paloa, ja myöhemmän ajanjakson palojen määrä oli 14057.

Taulukko 2. Maastopalot 2014–2018 (Pelastusopisto 2019, 17)

<b>MAASTOPALOT</b>					
	2014	2015	2016	2017	2018
Metsäpalo	1708	768	978	912	2491
Muu maastopalo	1929	876	1123	1351	1921
Yhteensä	3637	1644	2101	2263	4412

Maastopalojen aiheuttajana ihmisen toiminta on vuosittain suurin palojen aiheuttaja. Pelastustoimen taskutilastoihin 2008–2012 (Taulukko 3) ja 2014–2018 Taulukko 4) on koottu maastopalojen aiheuttajat.

Taulukko 3. Maastopalon aiheuttaja 2008–2012 (Pelastusopisto 2013, 17)

<b>MAASTOPALON AIHEUTTAJA</b>					
	2008	2009	2010	2011	2012
Ihmisen toiminta	2207	1989	1951	1717	724
Luonnontapahtuma tai -ilmiö	155	216	428	405	99
Koneen tai laitteen vika	73	86	120	82	26
Eläin	21	18	24	20	3
Palovaarallinen aine	6	13	9	16	3
Muu aiheuttaja	123	139	180	182	71
Aiheuttaja tuntematon	655	380	387	390	145

Taulukon 3 ja taulukon 4 mukaan ihmisen toiminnasta aiheutuneiden palojen määrä on kasvanut aiemmasta viisivuotiskaudesta ajanjaksolle 2014–2018 tultaessa. Jälkimmäisellä viisivuotiskaudella ihmisen toiminnasta aiheutuneista maastopaloja oli 233 paloa enemmän kuin aiemmalla viisivuotiskaudella.

Taulukko 4. Maastopalon aiheuttaja 2014–2018 (Pelastusopisto 2019, 17)

<b>MAASTOPALON AIHEUTTAJA</b>					
	2014	2015	2016	2017	2018
Ihmisen toiminta	2191	1110	1524	1708	2288
Luonnontapahtuma tai -ilmiö	685	152	130	103	836
Koneen tai laitteen vika	129	64	85	87	209
Eläin	26	9	20	25	20
Palovaarallinen aine	26	15	10	13	42
Muu aiheuttaja	147	76	89	69	262
Aiheuttaja tuntematon	433	216	243	257	653

Maastopalojen syttymissyitä on monia. Pelastusalan taskutilastojen 2008–2012 (Taulukko 5) tilastoista on huomattavissa ihmisen vaikutus maastopalojen syttymissyihin. Ihmisen toiminnan vaikutus näkyy maastopalojen syttymissyissä joko suoraan tai välillisesti. Esimerkiksi tulisijan tai hormin sytyttämä maastopalo on lähtöisin ihmisen toiminnasta.

Metsätöissä raivaussahan terän kiveen osumisen seurauksena syntynyt kipinä voi aiheuttaa maastopalon. Maanmuokkauksissa kaivurin kauhan tai telojen

käytöstä voi syntyä kipinöitä, samoin kuin metsäkoneidenkin teloista. Nämäkin tekijät voivat aiheuttaa metsäpalon. (Metsäkeskus 2016.)

Taulukko 5. Maastopalon syttymissyy 2008–2012 (Pelastusopisto 2013, 18)

MAASTOPALON SYTTYMISSYY					
	2008	2009	2010	2011	2012
Avotuli	2054	1749	1591	1471	556
Lasten tulen käsittely		147	131	114	53
Nuotio, grilli	531	391	425	348	147
Roskien poltto	324	360	353	326	121
Tulitikku, muu tulentekoväline	581	340	202	240	72
Savuke tai muu tupakka-aine	354	287	268	267	79
Kulotus	213	164	169	147	61
Luonnon syy	136	145	383	324	59
Salama	97	75	328	279	34
Kone, laite tai prosessi	162	132	162	166	42
Sähkölaite	84	26	31	21	9
Kuuma esine tai tuhka	121	123	127	136	54
Tulisija, hormi	13	14	12	21	4
Hankauslämpö, itsesyttymä, räjähdys	53	94	107	135	71
Tahallaan sytytetty palo		39	117	73	67
Muu tunnettu syy	95	151	198	152	60
Syy tuntematon	605	394	402	372	162

Luonnon syyt ja salamat ovat verrattain harvoin syttymissyyinä maastopaloissa. Eteläisessä Suomessa salama sytyttää maastopalon kerran kymmenessä vuodessa sadan neliökilometrin alueella, Pohjois-Suomessa salama sytyttää maastopalon sadan neliökilometrin alueella kerran sadassa vuodessa. (Larjavaara, Kuuluvainen, Tanskanen & Venäläinen 2004, 258–260; Keto-Tokoi & Kuuluvainen 2011, 128.) Ukkosmyrskyjä Lounais-Suomessa on noin 20 päivänä vuodessa. Pohjois-Suomessa viitenä päivänä vuoden aikana. Keskimäärin salama iskee yli 50 000 kertaa kesässä. (Hannelius & Kuusela 1995, 84.)

Maastopalojen sytymissyistä avotuli on useimmiten maastopalon syttymisen syy. Ajanjakson 2008–2012 jälkeen avotulen sytyttämien maastopalojen määrä on vähentynyt lähes 500 palolla (Taulukko 6).

Taulukko 6. Maastopalon sytymissy 2014–2018 (Pelastusopisto 2019, 17)

<b>MAASTOPALON SYTTYMISSYY</b>					
	2014	2015	2016	2017	2018
Avotuli	1761	890	1205	1337	1730
Lasten tulen käsittely	119	47	79	124	90
Nuotio, grilli	487	322	375	338	665
Roskien poltto	479	258	344	391	353
Savuke tai muu tupakka-aine	264	108	161	168	340
Kulutus	241	73	140	181	126
Luonnon syy	589	84	77	62	629
Salama	540	31	39	25	499
Kone, laite tai prosessi	165	84	125	104	318
Kuuma esine, tuhka, kipinä	148	78	108	134	246
Hankauslämpö, itsesyttymä, räjähdys	154	58	79	57	233
Tahallaan sytytetty palo	176	100	124	148	200
Muu tunnettu syy	178	113	102	111	324
Ei tiedossa	466	235	281	309	730

Maastopaloja sytytetään tahallisesti tai tahattomasti vuosittain satoja. Useasti huolimattomuus ja varomattomuus tulen käsittelyssä johtavat maastopaloihin. Tahallisuuden vaikutus on myös esitetty pelastustoimen taskutilastoissa 2008–2012 (Taulukko 7) ja 2014–2018 (Taulukko 8).

Taulukko 7. Maastopalon tahallisuus 2008–2012 (Pelastusopisto 2013, 18)

<b>MAASTOPALON TAHALLISUUS</b>					
	2008	2009	2010	2011	2012
Tahallinen	433	368	319	278	177
Huolimattomuus, varomattomuus	873	822	794	755	269
Vahinko	507	506	555	449	179
Ei tiedossa	394	293	283	235	99
<b>Yhteensä</b>	<b>2207</b>	<b>1989</b>	<b>1951</b>	<b>1717</b>	<b>724</b>

Huolimattomuudesta ja varomattomuudesta aiheutuneiden maastopalojen määrä on kasvanut selvästi. Ajanjaksolla 2008–2012 huolimattomuudesta ja

varomattomuudesta aiheutuneita maastopaloja oli 3513 ja myöhemmällä ajanjaksolla niitä oli 4103. Tahallisesti aiheutettujen maastopalojen määrä on vähentynyt aiemman ajanjakson 1575 palosta myöhemmän ajanjakson 1517 paloon (Taulukko 8).

Taulukko 8. Maastopalon tahallisuus 2014–2018 (Pelastusopisto 2019, 18)

MAASTOPALON TAHALLISUUS					
	2014	2015	2016	2017	2018
Tahallinen	346	211	268	281	411
Huolimattomuus, varomattomuus	1004	484	691	812	1112
Vahinko	595	273	379	395	528
Ei tiedossa	247	143	186	220	337
Yhteensä	2192	1111	1524	1708	2388

## 2.4 Maastopalot Ruotsissa

Granström (1996, 445) kirjoittaa Ahtiin, Hämet-Ahtiin ja Jalakseen (1968) viitaten Ruotsin kuuluvan eteläisimpiä osia ja luoteisimpia vuorialueita lukuun ottamatta boreaaliseen havumetsävyöhykkeeseen tai hemiboreaaliseen kasvillisuusvyöhykkeeseen. Vaikka Ruotsi levittäytyykin pohjois-eteläsuunnassa lähes 1500 kilometrin matkalle, varttuneen metsikön kasvillisuus on yllättävän samanlaista koko maassa. Kanervasukuiset kääpiövarvut dominoivat usein kenttäkerrosta. Varpujen alla kasvavat erilaiset lehtisammalet. Havupuulajeja on pääasiassa kaksi. Lisäksi Ruotsissa kasvaa vähäinen lajimäärä boreaalisia lehtipuulajeja. (Granström 1996, 445.) Kasvillisuus muistuttaa hyvin paljon Suomen ja Venäjän kasvillisuutta vastaavilla pituus- ja leveyspiireillä.

Ruotsin vuotuiset maastopaloalat vaihtelevat muutamasta sadasta hehtaarista muutamiin tuhansiin hehtaareihin, riippuen vallitsevista sääolosuhteista (Niklasson & Granström 2004, 80). Vuonna 2014 suuren metsäyhtiön aliurakoitsijan maanmuokkauksessa käyttämä kone syttyi palamaan ja aiheutti Ruotsissa suuren maastopalon (Lidskog, Johansson & Sjödin 2019, 320). Heinäkuussa 2018 Gävleborgin, Jämtlannin ja Taalainmaan lääneissä syttyi tuhoisa ja vaikeasti sammutettava maastopalo, jonka takia useita kyliä

asukkaineen jouduttiin evakuoimaan (Myndigheten för samhällskydd och beredskap 2018).

Ruotsin maastopalojen historiaa on selvitetty jo 1920-luvulla. Joel Wretlind tutki tuolloin tulen vaikutusta ekosysteemeihin. Varhaisimmat historialliset maastopalot Wretlind onnistui jäljittämään arkeologisten tutkimusmenetelmien avulla 1400-luvulle. (Granström 1996, 445.)

Yli 5000 hehtaarin maastopalot ovat olleet harvinaisia Ruotsissa 1950-luvun jälkeen (Centre for Climate Adaptation 2020a). Määrällisesti eniten maastopaloja Ruotsissa 1950-luvulla oli vuonna 1959, jolloin paloja oli yli 7000. Palot ovat olleet pienialaisia, koska kokonaishehtaarimäärä oli 9000 hehtaaria. Vuonna 1969 maastopaloja oli 4276, jolloin maastoa paloi 5601 hehtaarin alueelta. Tilaston mukaan vuonna 1997 maastopaloja oli lähes 8500 ja yli 6000 hehtaaria maastoa altistui tulen vaikutukselle. Vuonna 2002 maastopalojen määrä oli 6000. Paloalat ovat olleet pieniä, koska vain 2500 hehtaaria altistui tulelle. (Hansen 2003, 18.) Vuonna 2014 neljän kunnan alueella vaikuttaneet maastopalot polttivat noin 14 000 hehtaarin alueen (Lidskog ym. 2019, 320). Kesällä 2018 Ruotsissa riehuneet maastopalot polttivat noin 25 000 hehtaarin alueen. Ruotsin valtion mailla paloi noin 4000 hehtaarin edestä talousmetsää. (Sveaskog 2018.)

Vuosina 1957–1969 Ruotsin maastopaloihin johtaneista tekijöistä 17 % johtui lasten tulen käsittelystä, 3 % tupakoinnista, 6 % liikenteestä ja 4 % grillaamisesta tai leiritulesta. Tuntematon tekijä sytytti palon 34 prosentissa paloista, ja 29 prosentissa palon aiheutui jostakin muusta tunnetusta syystä. Salaman aiheuttamia maastopaloja oli tuolloin 7 prosenttia kaikista paloista. (Myndigheten för samhällskydd och beredskap 2017, 8.)

Ruotsin pelastustoimen tilaston mukaan ajanjakson 1996–2000 kymmenen yleisintä syytä olivat salama, nuotio, lasten leikkiminen tulella, tahallisesti sytytetty palo, uudelleensyttyminen, ruohikkopalo, kipinä, junan jarrutus, tupakointi tai muu syy. Tuntematon tekijä sytytti maastopalon kyseisenä ajanjaksona yli 1100 kertaa. (Hansen 2003, 19.)

Vuosina 1998–2014 Ruotsin maastopaloihin johtaneista tekijöistä 9 % johtui lasten tulen käsittelystä, 1 % tupakoinnista, 1 % liikenteestä ja 11 % grillaamisesta tai leiritulesta. Palon syyttäjä jäi tuntemattomaksi 41 prosentissa tapauksista ja 30 prosentissa palon aiheutti joku muu tunnettu syy. Salaman sytyttämiä maastopaloja ajanjaksolla 1998–2014 oli 7 prosenttia kaikista paloista. (Myndigheten för samhällskydd och beredskap 2017, 8). Ihmisen toiminta on hyvin monesti syttymissyynä myös Ruotsin maastopaloissa. Viimeisten muutaman sadan vuoden aikana ihmisen vaikutus maastopaloihin on ollut merkittävä (Granström 1996, 450).

## 2.5 Maastopalot Venäjällä

Venäjän metsistä lähes 95 prosenttia kuuluu pohjoiseen havumetsävyöhykkeeseen. Venäläisessä terminologiassa pohjoista havumetsävyöhykettä kutsutaan taigaksi. (Kauhanen 2007, 27.) Venäjän metsistä 78 prosenttia sijaitsee maan Aasian puoleisissa osissa ja 22 prosenttia Venäjän Euroopan puoleisissa osissa. Metsä peittää koko Venäjän maapinta-alasta puolet. Venäjän metsien pinta-ala on 23 prosenttia koko maailman metsien pinta-alasta. (Nilsson & Shvidenko 1997.)

Maastopalot ovat olleet lisääntyvä ongelma Venäjällä jo yli vuosikymmenen. Kesän 2010 maastopalot nousivat julkiseen tietoon, kun tuli tuhosi laajoja metsäalueita, lukuisia ihmisasumuksia sekä aiheutti suuria taloudellisia ja yhteiskunnallisia menetyksiä. Maastopalojen savukaasut aiheuttivat myös terveydellisiä ongelmia suurissa kaupungeissa. Palojen laajuus oli poikkeuksellisen suurta Venäjän Euroopan puoleisissa osissa, keskisellä- ja Volgan federaatiopiirillä sekä eteläisellä federaatiopiirillä. (Karvinen ym. 2011, 43.)

Maastopalojen hallinnan ongelmat ovat nähtävissä palojen laajuudessa. Erikoistuneen metsien suojelun osavaltiorakenteen ja metsäpaloilta suojautumistoimiston lakkauttaminen sekä palovalvonnan ja sammutustoimen siirtäminen maakunnille eivät johtaneet toivottuihin lopputuloksiin. Venäjän metsähallinnon uudelleenorganisoinnissa puolet metsätalouden työpaikoista

lakkautettiin, mikä on vaikuttanut luonnollisesti kykyyn käsitellä maastopaloja. Vuonna 2006 Venäjän metsähallinnon yksiköissä työskenteli 91 000 henkilöä. Metsähallinnon uudelleen järjestelyiden jälkeen, vuonna 2010, metsähallinnon yksiköissä työskenteli 38 000 henkilöä. (Karvinen ym. 2011, 43–44.)

Viime vuosisadan alussa palontorjuntaa ei Venäjällä käytännössä ollut lainkaan. Tuolloin maastopaloja esiintyi 600 000–700 000 hehtaarilla vuosittain. (Karpachevskiy 2004, 4.) Nykyisin Venäjällä esiintyy 10 000–34 000 maastopaloa. Palojen vuotuiset kokonaispinta-alat vaihtelevat 200 000 ja 2,7 miljoonan hehtaarin välillä. (Korovin 1996, 114.) Venäjän virallisten tilastojen mukaan vuosina 2008–2010 maastopaloja esiintyi yhteensä kahden miljoonan hehtaarin alueella. Keskimääräisen paloalueen koon on ilmoitettu olevan kymmenen hehtaaria Venäjän Euroopan puoleisissa osissa, Venäjän Kaukoidässä paloalueet ovat voineet olla satojen hehtaarien laajuisia. (Karvinen ym. 2011, 44.)

Virallisten tilastotietojen tarkkuutta maastopalojen yhteydessä on kritisoitu. Vuonna 2010 kaksi riippumatonta tutkimusorganisaatiota, Venäjän tiedeakatemian V.N. Sukachevin metsäinstituutti ja avaruuden tutkimusinstituutti arvioivat maastopalojen laajuudeksi kuusi miljoonaa hehtaaria. (Karvinen ym. 2011, 44.) Venäjän metsistä noin 40 prosenttia on valvomattomia alueita, jotka sijaitsevat Siperiassa ja Venäjän Kaukoidässä (Shvidenko & Nilsson 2000, 139–141). Satelliittikuvien perusteella maastopaloalueet ovat suurempia kuin virallisissa tilastoissa ilmoitetaan (Goldammer & Stocks 2000, 55–57).

Venäjällä yleisin maastopalon aiheuttaja on ihminen. Omalla toiminnallaan ihminen aiheuttaa yli 60 prosenttia Venäjän maastopaloista. (Gromtsev 2002, 43; Karvinen ym. 2011, 44.) Lisääntyneiden matkailijamäärien myötä varomattomasta tulenkäytöstä aiheutuneita maastopaloja esiintyy yhä useammin. Maastopalon sytyttää monesti huolimaton asenne avotulta kohtaan tai sammuttamattoman savukkeen heittäminen maastoon. (Miettinen 2007, 150.) Maanparannustarkoituksessa tehdyt poltot maataloudessa aiheuttavat suuren osan maastopaloista. Lasten huolimaton tulenkäyttö, metsästäjien, kalastajien ja sienten ja marjojen poimijoiden toiminnan seurauksena syttyneet maastopalot



ovat myös hyvin yleisiä. Ajoneuvojen aiheuttamat kipinät sytyttävät maastoa palamaan. Palot saavat alkunsa useasti ihmisen asuin ympäristön, teiden, maatalousmaan tai muun infrastruktuurin läheisyydestä. (Karpachevskiy 2004, 3.)

Luonnontapahtuma- tai ilmiö sytyttää maastopalon noin 17 prosentissa Venäjän paloista. Yleisimmän syttymissyyn arvellaan olevan salama. Tuntemattomaksi jääneestä syystä palo syttyy myös noin 17 prosentissa Venäjän maastopaloista. (Conard & Ivanova 1997, 308–310.)

### 3 PALOMUODOT

#### 3.1 Palomuotojen luokittelu

Palontorjunnan ja paloriskien arvioinnin kannalta on oleellista tietää eri palomuodot. Palon kuluttaman paloaineskerroksen perusteella voidaan palot luokitella eri muotoihin. Maapalossa palo kulkee maa- ja pohjakerroksessa. Pintapalossa tuli polttaa pohja- ja kenttäkerroksen kasvillisuutta. Puiden latvoihin nousutta paloa kutsutaan latvapaloksi. Yksittäisistä, puiden palokaasuista johtuvista latvuspaloista, puhutaan soihtupaloina. Ilmavirtausten paloalueen ulkopuolelle kuljettamia paloja kutsutaan heitepaloina. Palon eri muotoja esiintyy usein samoissa paloissa. (Heikkilä ym. 2011, 21–26.)

Maastopaloissa käytetään usein luokittelua, jossa päällimmäisen palavan aineksen kerroksen sijainti määrittää palon (maapalo, pintapalo ja latvapalo). Palavan aineen luokittelussa voidaan ajatella samoin. Maan paloainekset sisältävät pitkälle maatonutusta orgaanista ja epäorgaanista ainesta, kuten juuria, turvetta, lahoppua, maa-ainesta ja kaarnaa, joka on peräisin maahan pudonneista risuista ja oksista. (Nelson Jr. 2001, 81.) Maan paloaineksiin palokerroksista kuuluvat maakerros, pohjakerros ja pintakerros eli karikekerros, sammal- ja jäkäläkerros (Heikkilä ym. 2011, 37).

Pinta-ainekset koostuvat hiljattain pudonneista, osittain maatuneista puun lehdistä, havunneulasista, pudonneista risuista, oksista, elävistä tai kuolleista heinistä, ruohovartisista kukkivista kasveista ja varvuista (Nelson Jr. 2001, 81). Pinta-aineksiin kuuluvat kenttä-, pensas- ja taimikerros. Myös puun taimet luetaan tähän kategoriaan (Heikkilä ym. 2011, 37).

Latvusainekset koostuvat puiden ja korkeiden pensaiden latvuksista. Lehtensä pudottavat lajit kuuluvat myös latvusaineksiin, vaikka tuli harvoin leviää näiden latvusten kautta, koska ne ovat suhteellisen harvoja ja sisältävät enemmän kosteutta kuin havupuiden latvukset. (Nelson Jr. 2001, 81.)

### 3.2 Maapalo

Maapalossa karikkekerroksen alla tuli etenee hitaasti palaen, aiheuttaen savua, muttei näkyvää tulta (Kuvio 5). Polttoaineena toimivat muun muassa turve, kuolleet sammalet ja jäkälät sekä lahopuu. (Brown & Smith 2000, 248.)



Kuvio 5. Maapalo (Heikkilä ym. 2011, 22)

Maapalot voivat olla hyvin pitkäikäisiä. Palojen kesto voi olla kuukausia tai jopa vuosia. Sopivissa olosuhteissa maapalot voivat kehittyä pintapaloiksi ja pintapalosta edelleen latvapaloiksi. (Heikkilä ym. 2011, 23.)

### 3.3 Pintapalo

Pintapalossa maan pintaa lähellä oleva karikkekerros ja muu elävä ja kuollut aines palavat yleensä liekehtien (Kuvio 6) ja tuhoten kasvillisuutta (Brown & Smith 2000, 248). Pintakerroksen ainekset ovat helposti syttyviä. Tästä syystä useimmat palot alkavat pintapaloina. Palon sammuttaminen on palon tässä vaiheessa vielä selkeää ja palon etenemisen ennustaminen on suhteellisen helppoa. (Heikkilä ym. 2011, 23.) Suomen maasto- ja metsäpaloista suurin osa

on pintakasvillisuuspaloja (Heikkilä ym. 1999, 53). Pintapalot aiheuttavat vähiten vahinkoa metsille (Government of Canada 2019).



Kuvio 6. Pintapalo (Heikkilä ym. 2011, 22)

### 3.4 Latvapalo

Palavan aineksen pystysuuntainen jatkuvuus, pintapalon korkea voimakkuus ja useasti myös kova tuuli ovat edellytyksenä latvapaloille (Heikkilä ym. 2011, 23). Latvapalon edellytyksiä ovat lisäksi havupuuvaltainen metsä tai sekametsä, jossa on eri-ikäisrakenteisuutta (Heikkilä ym. 1999, 54). Latvapaloja (Kuvio 7) pidetään kaikkein intensiivisimpinä ja vaarallisimpina paloina (Government of Canada 2019). Latvapalo vaatii suuren määrän sammutusvoimia sekä taitoa tulen taltuttamiseksi. (Heikkilä ym. 1999, 54).



Kuvio 7. Latvapalo (Heikkilä ym. 2011, 24)

### 3.5 Soihtupalo

Soihtupalo tai passiivinen latvapalo ei kykene leviämään latvustossa laajemmalle, vaan se polttaa lähinnä yksittäisiä puita (Kuvio 8) tai puuryhmiä. Aktiivinen latvapalo liikkuu koko metsikön alueella yhtäaikaisesti, alemmissa kerroksissa ja latvuksissa. (Heikkilä ym. 2011, 23.) Heikkilä, Lindberg ja Vanha-Majamaa (2011, 23) ovat todenneet Alexanderiin (2006) ja Van Wagneriin (1977) viitaten, että tulen edetessä nopeammin latvuserroksessa, puhutaan itsenäisestä latvapalosta.



Kuvio 8. Soihtupalo (Heikkilä ym. 2011, 25)

### 3.6 Heitepalo

Latvapaloissa palavaa ainetta siirtyy ilmvirtausten mukana kauemmaksi varsinaisesta paloalueesta (Heikkilä ym. 2011, 26). Lehdet, oksat ja kaarna voivat sytyttää uuden maastopalon (Kuvio 9) etäällä alkuperäisestä tulen lähteestä (The Bushfire Foundation Inc. 2020a). Heitepaloriskiä voidaan ennustaa ja mallintaa erilaisilla menetelmillä (Albini 1979, 5–7). Heitepalojen riski on huomioitava myös matalamman intensiteetin paloissa, koska myös niissä kipinöiden ja muun palavan aineksen kulkeutuminen paloalueelta kauemmaksi on mahdollista (Heikkilä ym. 2011, 26–27).



Kuvio 9. Heitepalo (Heikkilä ym. 2011, 26)

## 4 MAASTOPALON LEVIÄMINEN

### 4.1 Maastopalon käyttäytymiseen ja leviämiseen vaikuttavat tekijät

Maastopalojen käyttäytymiseen vaikuttavia perustekijöitä on kolme. Nämä tekijät ovat palava aines, topografia ja sää. (Heikkilä ym. 1999, 47; Hansen 2003, 31; Heikkilä ym. 2010, 87.) Maastopalon etenemisen päättelemiseksi on tiedettävä mikä palon sytyttää, miten palo syttyy, kuinka nopeasti ja mihin suuntaan maastopalo leviää, miksi tuli palaa niin kuin se palaa, millä aikavälillä ja milloin tuli palaa. Maasto-, sää- ja metsälliset olosuhteet tulee olla tiedossa. (Heikkilä ym. 1999, 44.)

Tulen käyttäytymisen tuntemisen avulla voidaan maastopalon etenemistä ennustaa. Sammutustyön suunnittelussa ja toteuttamisessa tulen käyttäytymisen tunteminen mahdollistaa palojen tehokkaan sammutuksen sekä varautumisen ja ennaltaehkäisyyn. Sammutustöiden tekijöiden työturvallisuus on helpompi arvioida ja huomioida, kun tunnetaan, miten tuli käyttäytyy. (Heikkilä ym. 1999, 44.)

#### 4.1.1 Palava aines eli polttoaine

Maastopaloissa palava aines on lähes aina biomassapolttoainetta eli eloperäistä palavaa ainesta (Heikkilä ym. 2011, 17). Polttoaineeksi luetaan mikä tahansa orgaaninen materiaali, joka voi syttyä ja palaa (Heikkilä ym. 1999, 47; Heikkilä ym. 2010, 88). Neljä suurinta polttoaineryhmää ovat sammalet, heinät, pensaat ja puut (Hansen 2003, 31).

Palavan aineksen eli polttoaineen koostumuksella on suuri merkitys palamisnopeuden määrittämisessä. Yleisesti polttoaine jaetaan lähteestä vaihdellen kahteen tai kolmeen eri pääluokkaan: kevyisiin ja ohuisiin palaviin aineksiin sekä raskaisiin ja järeisiin palaviin aineksiin ja turpeeseen. Kevyitä ja ohuita palavia aineksia ovat muun muassa pienet oksat, lehdet, neulaset, heinät, varvut, kävyt ja ruohot. Raskaita ja järeitä palavia aineksia ovat muun muassa pystyssä olevat puut, kannot, kaatuneet puunrungot ja tukit. (Heikkilä ym. 1999,



47; Hansen 2003, 32; Heikkilä ym. 2010, 88.) Turve koostuu kerrostuneista, epätäydellisesti hajonneista kasvien jäänteistä, jotka muodostavat orgaanisen maalajin muodostumispaikalleen. Turvepohjaisen maan pintakerros on syttymisherkkä riittävän kuivumisen jälkeen. (Pohjois-Suomen aluehallintovirasto 2010, 37.)

Maastopaloissa palavan aineksen tyypillä ja koolla on suuri merkitys sille, miten tuli palaa. Myös palavan aineksen sijainnilla ja järjestäytyneisyydellä on merkitystä palon etenemisen voimakkuuteen ja nopeuteen. Palon etenemiseen ja sen nopeuteen vaikuttavat vaakatasossa olevat yksittäiset kappaleet ja puuainemäärät. Vaakatasossa toisiaan lähellä sijaitsevat puuainekset aiheuttavat voimakkaan palon, joka etenee nopeasti. Pystytasossa olevat puut vaikuttavat palon etenemisen nopeuteen. Palon leviäminen latvapaloksi aiheutuu pystytason palavasta materiaalista. Pystytasoisen palavan materiaalin loppuminen tai puuttuminen voi muuttaa latvapalon takaisin maapaloksi. (Heikkilä ym. 1999, 47–48; Heikkilä ym. 2010, 89.)

Maastopalon intensiteettiin vaikuttaa palon käytettävissä olevan palokuorman eli palavan aineksen hehtaarikohtainen määrä. Mitä enemmän palavaa ainesta paloalueelta löytyy, sitä voimakkaammin maastopalo palaa ja tuottaa kuumuutta. Suomen olosuhteissa palokuorma voi olla heinittyneillä, puuttomilla alueilla 1–10 tonnia hehtaaria kohden, kun varttuneessa metsikössä palokuorma voi olla 200–500 tonnia hehtaarilla. (Heikkilä ym. 1999, 48.) Maantieteellinen sijainti ja kasvupaikka vaikuttavat palokuorman määrään. Palokuorma voi olla sopivien kasvuolosuhteiden alueilla heinikkoisten alueiden osalta 2,5–12,5 tonnia hehtaarilla ja vahvasti puustoisten alueiden osalta 250–1500 tonnia hehtaarilla (Heikkilä ym. 2010, 89).

Maastopalon polttoaineen palamis- ja polttamiskykyä määrittelee palavan aineksen kosteus. Polttoaineen kosteus on seurausta menneisyyden ja nykyisyyden sääoloista. Palavan aineksen sisältämä kosteus on peräisin maaperästä, sadannasta ja ilmastosta. Ilman suhteellinen kosteus vaikuttaa palavan aineksen kosteuspitoisuuteen. Ilman suhteellisen kosteuden ollessa suuri, on polttoaine kosteampaa kuin ilman suhteellisen kosteuden ollessa pieni.

Tällöin polttoaine on kuivempaa. Polttoaineen ollessa märkää, maastopalojen syttyminen on vaikeampaa. Kuiva polttoaine syttyy nopeasti ja leviää helposti ja voimakkaasti. (Heikkilä ym. 1999, 48; Heikkilä ym. 2010, 90.)

Liekkien korkeus ja palon etenemisen nopeus ovat suorassa suhteessa palavan aineksen palokuormaan. Jos palavan aineksen määrä kaksinkertaistuu, myös liekkien korkeus kaksinkertaistuu ja palon etenemisnopeus tuplaantuu. Edellytyksenä on, että palava aines on sijainniltaan ja ominaisuuksiltaan samanlaista. Kevyen ja ohuen palavan aineksen leviämisen nopeus kasvaa palavan aineksen määrää nopeammin. Kevyitä ja ohuita palavia aineksia ovat esimerkiksi heinät ja ruohot. Sopivissa olosuhteissa palon etenemisnopeus voi kolminkertaistua palavan aineksen määrän kaksinkertaistuessa. (Heikkilä ym. 1999, 48.)

#### 4.1.2 Topografia

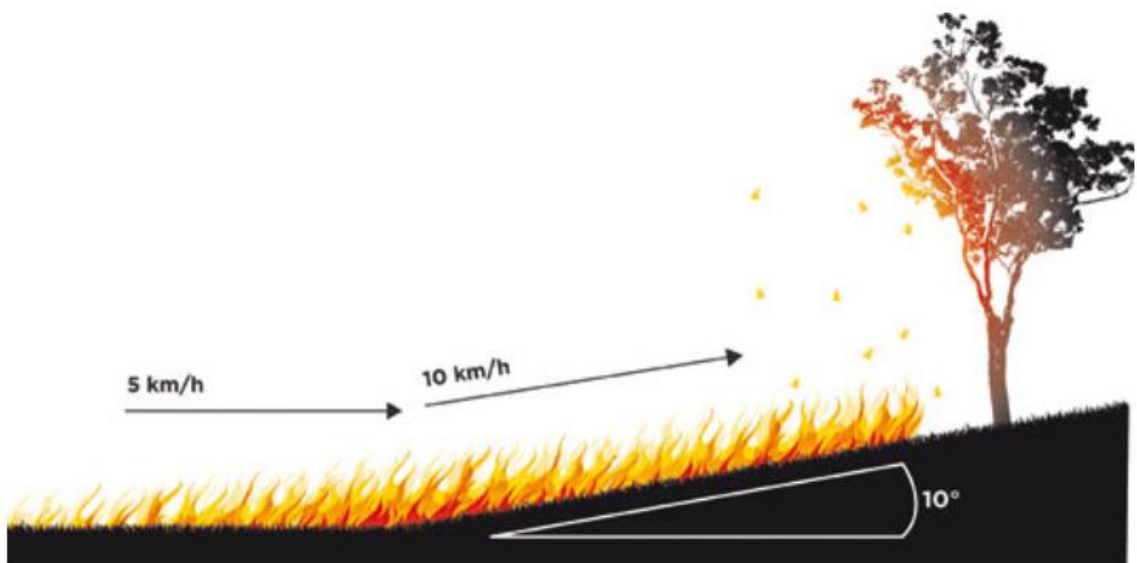
Toinen maastopalon leviämiseen ja tulen käyttäytymiseen vaikuttava tekijä on topografia. Topografialla tarkoitetaan maapallon pinnanmuotojen fyysisiä ominaisuuksia. Topografinen tieto kertoo, onko maasto tasaista vai kumpuilevaa. Vesistöjen läheisyys, kalliot ja suot näkyvät topografisena tietona. (Heikkilä ym. 2010, 97.) Yhdessä tuulen suunnan ja nopeuden kanssa topografia on tulen leviämissuunnan- ja nopeuden merkittävä tekijä tulen käyttäytymisessä. Maastopalon alussa palon määräävä tekijä on yleensä tuuli, mutta palon voimistuessa topografia voi muuttua palon määrääväksi tekijäksi. (Lemberg & Puttonen 2002, 22.)

Maastopaloille luonnollisia esteitä ovat tiet, voimalinjat, hakkuuaukeat, kalliot, järvet, joet, suot, kosteikot, pellot ja lehtipuumetsiköt. Luonnonesteillä palon edellytyksiä ei ole olemassa tai palo on vaivalloista. Metsäsuunnittelulla ja istutuksilla voidaan vaikuttaa ennaltaehkäisevästi palon leviämiseen arvokkaille tai suurille metsäalueille. (Heikkilä ym. 1999, 52.)

Rinteillä on suuri vaikutus maastopalojen etenemiseen ja kulkuun. Palo etenee ylärinteeseen huomattavasti nopeammin kuin tasaisella maalla. Maastopalo

etenee ja leviää alarinteessä huomattavasti hitaammin verrattuna tasaisen maan paloon tai ylärinteessä tapahtuvaan paloon. (Heikkilä ym. 1999, 52.) Etelän puoleisilla rinteillä palot etenevät ja kehittyvät nopeammin. Eteläiset rinteet saavat enemmän auringonvaloa ja lämpöä ja myös palava aines sisältää vähemmän kosteutta altistuttuaan korkeammille lämpötiloille kuin pohjoisen puoleiset rinteet ja niiden palavat ainekset. (Hansen 2003, 42.) Maastopalon eteneminen on sitä nopeampaa, mitä jyrkemmin rinne nousee (Lemberg & Puttonen 2002, 22). Maastopalot pyrkivät kääntämään suuntansa rinteiden tai jyrkänteiden huippuja kohti. (Heikkilä ym. 1999, 52; Lemberg & Puttonen 2002, 22).

Rinteissä maastopalot saavuttavat nopeammin palamatonta ainesta. Säteilevä lämpö esilämmittää tulen edessä olevan polttoaineen, joka tekee palavasta aineksesta entistä herkemmin syttyvän. Ylärinteessä maastopalo saavuttaa enemmän polttoainetta kuin tasaisella maalla tai alarinteessä. Säteilevän lämmön esilämmittämän polttoaineen määrä on pienempi kuin ylärinteissä tai tasaisessa maastossa. Jyrkkyydeltään kymmenen asteen ylämäessä tuli kaksinkertaistaa etenemisnopeutensa (Kuvio 10). Jyrkkyydeltään kymmenen asteen alamäessä tulen etenemisnopeus puolittuu. (The Bushfire Foundation Inc. 2020b.)



Kuvio 10. Maastopalon eteneminen rinteessä (The Bushfire Foundation Inc. 2020b)

#### 4.1.3 Sää

Kolmantena maastopalon leviämiseen ja tulen käyttäytymiseen vaikuttavana tekijä on sää. Sateen määrä ja ajankohta, ilman suhteellinen kosteus, tuuli, lämpötila ja ukkonen vaikuttavat palon leviämiseen ja sen voimakkuuteen. (Heikkilä ym. 1999, 49–51.) Paikkaansa pitävää tulen käyttäytymisen analyysia ei voida tehdä ainoastaan yhden säätekijän perusteella. Tulen käyttäytyminen on monen tekijän summa, tämän takia edellä luetellut säätekijät on otettava huomioon kokonaisuuden arvioinnissa. (Heikkilä ym. 2010, 92.) Suomessa todella laaja-alaisia ja tuhoisia maastopaloja tapahtuu harvoin. Palokauden aikaiset pitkät sateettomat jaksot ja voimakkaat tuulet puuttuvat Suomen paloympäristöstä. (Tanskanen 2007, 41.)

Pitkäaikaisen tilastoinnin mukaan Suomessa vesisateita on enemmän loppukesästä kuin alkukesästä. Toukokuussa keskimääräinen sademäärä on 35 millimetriä maan etelä- ja keskiosissa ja 30 millimetriä maan pohjoisosissa. Syyskuun keskimääräinen sademäärä on maan etelä- ja keskiosissa 60 millimetriä ja maan pohjoisosissa 55 millimetriä. (Heikkilä ym. 1999, 49–50). Suomessa vuotuinen sademäärä vaihtelee 500–750 millimetrin välillä. Vähiten sataa Lapissa ja suurimmat sateet satavat Itä-Suomessa ja sisämaassa Etelä-Suomessa. (Saukkonen 2020, 25.)

Palavan aineksen kosteuspitoisuuteen sade vaikuttaa välittömästi. Kova sade kostuttaa polttoaineen pidemmäksi aikaa kuin kevyt vesisade. Kevyt palava aines imee kosteuden nopeammin ja kuivuu nopeammin. Raskaat palavat ainekset imevät kosteutta hitaammin ja kuivuvat hitaammin. (Heikkilä ym. 1999, 49–50).

Suhteellinen kosteus on yleisin ilman kosteuden määrää ilmaiseva suure. Suhteellinen kosteus on prosenttiluku, jolla ilmaistaan, kuinka paljon ilmassa on vesihöyryä siihen nähden, mitä kyseisessä lämpötilassa voi olla enimmillään vesihöyryä. (Ilmatieteen laitos 2020a.) Toisin sanoen suhteellinen kosteus on ilmassa sisällyttävän kosteuden suhde samassa lämpötilassa samaan ilman määrään mahtuvaan maksimikosteuteen (Heikkilä ym. 1999,49). Vesihöyryn määrän ilmassa määräävä tekijä on lämpötila. Alemmassa lämpötilassa ilmaan

mahtuu vähemmän kosteutta kuin korkeammassa lämpötilassa. (Heikkilä ym. 1999, 49; Ilmatieteen laitos 2020a.) Alhaisimmillaan ilman kosteus on aurinkoisten päivien iltapäivinä, jolloin suhteellinen kosteus on 30–50 prosenttia. Suhteellinen kosteus voi nousta sateisina päivinä 70–90 prosenttiin. Öisin suhteellinen kosteus on yli 70 prosenttia. Loppukesästä yöllä suhteellinen kosteus voi olla yli 90 prosenttia. Maastopalon voi sammuttaa iltaa ja yötä kohti nouseva suhteellinen kosteus. (Heikkilä ym. 1999, 49.)

Tuuli on ilmakehässä maan pinnan muotojen suuntaisesti liikkuvaa ilmaa, joka on yksi maastopalojen etenemiseen ja leviämiseen vaikuttavista tekijöistä. Tuuli vaikuttaa palavien aineiden kuivumiseen. Se lisää hapen määrää paloissa ja esilämmittää polttoaineita. Voimakas tuuli painaa konvektiopilaria maan pintaa vasten aiheuttaen äkillistä polttoaineiden kuivumista ja lämpenemistä, mikä levittää paloa voimakkaasti ja kiihtyvällä nopeudella tuulen suunnan määrittämänä. (Heikkilä ym. 1999, 50; Introduction to Wildland Fire Behavior S-190 2006, 2C.15; Pohjois-Suomen aluehallintovirasto 2010, 40.) Tuuli voi massakuljettaa palavia oksia, risuja, kaarnaa ja lehtiä jopa yli sadan metrin päähän varsinaisesta paloalueesta, aiheuttaen uusia palopesäkkeitä (Pohjois-Suomen aluehallintovirasto 2010, 40).

Tuulen käyttäytymistä on vaikea ennakoida ja tämän vuoksi maastopaloissa tuulen suuntaan, voimakkuuteen ja vaihtelevuuteen on kiinnitettävä erityistä huomiota. Palo voi heittelehtiä puuskaisten ja vaihtelevien tuulten takia ja jopa saartaa sammuttajat. (Heikkilä ym. 1999, 51; Introduction to Wildland Fire Behavior S-190 2006, 2C.15.) Tuulen nopeuden lisääntyessä neljällä metrillä sekunnissa, maastopalo leviää kaksi kertaa nopeammin. Palon leviäminen nopeutuu aina tuulen voimistuessa. (Heikkilä ym. 1999, 50–51.) Tuulen nopeudella on suora yhteys ilmanpaineen muutoksiin. Tuuli on sitä voimakkaampi, mitä nopeammin ilmanpaine laskee tai nousee lyhyellä matkalla pisteestä A pisteeseen B. (Ilmatieteen laitos 2020b.)

Palavan aineksen kosteuteen ja sen kuivumiseen vaikuttaa suoraan myös lämpötila. Korkeassa lämpötilassa maasto ja kasvusto palaa kovemmallalla intensiteetillä kuin matalammassa lämpötilassa. (Pohjois-Suomen

aluehallintovirasto 2010, 40.) Iltapäivisin korkeat lämpötilat voivat synnyttää niin sanotun Torch-ilmiön, pyörreilmiön. Se aiheutuu pyörteisistä ilmavirtauksista, palon omien lämpimien virtausten kanssa. Torch-ilmiö voi levittää uusia palopesäkkeitä mihin tahansa suuntaan. (Heikkilä ym. 1999, 51)

Sääilmiöistä ukkonen ja ukonilmalla metsään iskevät salammat aiheuttavat maastopaloja erityisesti silloin, kun maasto on kuivaa (Heikkilä ym. 1999, 51). Maaston ollessa kuivaa, pienet ukkoskuurot sytyttävät maastopalon tehokkaimmin. Pienten ukkoskuurojen vähäinen sademäärä ei kastele palavaa ainesta tai alenna sen syttymisherkkyttä verrattuna voimakkaisiin ukkosmyrskyihin, joissa vettä sataa runsaasti. (Larjavaara 2005, 21.) Etelä-Suomessa maastopaloja esiintyy enemmän pidemmän kasvukauden ja kuivemman alkukesän ansiosta. Pohjois-Suomessa kasvukausi on lyhyempi, alkukesä kosteampi ja ukonilmoja on vähemmän. Sodankylän metsät ovat palaneet luontaisesti noin 20 kertaa harvemmin edellä mainittujen syiden takia kuin Lahden korkeudella sijaitsevat metsät. (Larjavaara 2005, 23.)

Suomen olosuhteissa puoliavoimet ja puuttomat alueet kuivuvat tuulen ja lämpötilan vaikutuksesta peitteistä maastoaluetta nopeammin ja ovat siksi herkempiä syttymiselle. Polttokokeiden mukaan nopeimmin eteneviä ja voimakkaimpia palot ovat 30–45-vuotiaissa puolukkatyyppin männiköissä. Sulkeutuneiden kuusikoiden syttymisherkkyys on metsikkörakenteista alhaisinta. Paloista yleisimpiä ovat pintapalot, joskin tiheiden männiköiden latvuskerros osallistui myös palamisreaktioon. (Tanskanen 2007, 41.)

#### 4.2 Maastopalon leviämistavat

Maastopalon syttymisessä osa paloaineksesta on saavuttanut lämpötilan, joka mahdollistaa palon alkamisen. Palava aines voi sytyttää lähellään olevan palavan materiaalin ja palon kasvaminen tapahtuu yleensä kasvavalla vauhdilla, koska palo synnyttää lämpöä ja lämpösäteilyä. Pienten palavien ainesten, kuten heinien ja pienten oksien synnyttämä lämpösäteily ei ole voimakasta. Sammutustoimetkin ovat kevyempiä kuin sammutettaessa raskaampia paloaineiksia. Kannot, isot oksat ja puunrungot vaativat enemmän lämpöä

syttyäkseen. Palon eteneminen massiivisessa paloaineksessa vaatii suuren määrän lämpöä ja lämpösäteilyä. Raskas paloaines vaatii myös raskaampia sammutustoimia. (Heikkilä ym. 1999, 44–45.)

Lämpö on energiamuoto, joka voi liikkua tai siirtyä aineesta toiseen (Heikkilä, Grönqvist & Jurvelius 2010, 86). Maastopalo voi levitä lämmön siirtymisenä, lämpösäteilynä, lämmön johtumisena tai palavan aineksen kulkeutumisella, jota kutsutaan myös massakulkeutumiseksi. (Heikkilä ym. 1999, 46; Lemberg & Puttonen 2002, 19–20; Heikkilä ym. 2011, 18–19).

#### 4.3 Lämmön siirtymistavat

Kuumien ilmvirtausten palon etenemissuuntaan kulkevien lämmön ja savukaasujen liikkumista maastopalojen yhteydessä kutsutaan lämmön siirtymiseksi. Maaston pinnanmuodot ja tuulen voimakkuus ja suunta vaikuttavat lämmön siirtymisen etenemissuuntaan. (Heikkilä ym. 2011, 19.) Lämmön siirtymisessä eli konvektiossa tai kuljettumisessa muodostuu kuumaa ilmaa ja savukaasuja, jotka maastopaloissa kohtaavat esilämenneitä paloaineiksia. Konvektio edesauttaa maastopalon leviämistä. (Heikkilä ym. 2010, 87.)

Lämpösäteilyssä lämpö siirtyy tilassa riippumatta kuuman ilman liikkumisen vaikutuksista. Lämpösäteilyssä lämpö liikkuu tasaisesti joka suuntaan ja lämmön säteileminen on maastopalon etenemisessä useimmiten paloa levittävä tekijä. (Heikkilä ym. 2010, 86; Heikkilä ym. 2011, 19.) Maastopalon voimakkuus on suorassa riippuvuussuhteessa lämpösäteilyn voimakkuuteen. (Heikkilä ym. 2011, 19.) Maastopalossa tulen intensiteetin laskemisessa voidaan käyttää Lembergin (2001) mukaan Chandlerin ym. (1983) yhtälöä (kaava 1), joka ilmoittaa, millä nopeudella tuli tuottaa lämpöä. Tulen intensiteetti ei ole mitattavissa oleva suure, mutta tulen intensiteetti pysytään ilmaisemaan laskennallisesti. (Lemberg 2001, 8.)

$$I = 0,007 HWR \quad (1)$$

missä

$I$	on	tulirintaman (Byram 1959, 61–89) intensiteetti (kW/m)
$H$	on	palavan aineksen tuottama lämpöenergian määrä (cal/g)
$W$	on	palokuorma (t/ha)
$R$	on	tulen leviämisenopeus (m/min).

Lämmön johtumisessa eli konduktiossa lämpö siirtyy aineen sisällä tai aineesta toiseen. Boreaalisen havumetsävyöhykkeen metsien paloainesten lämmönjohtavuus on heikko. Lämmön johtumisella ei ole suurta merkitystä maastopalojen leviämisessä paloainesten huonon lämmönjohtokyvyn takia. (Heikkilä ym. 2010, 87; Heikkilä ym. 2011, 19.) Rakennuspaloissa lämmön johtumisella on suuri merkitys. Rakennuksien rungoissa ja rakenteissa käytetään useasti metallia ja monet metallit ovat lämmönjohtamiskyvyiltään hyviä.

Maastopalojen palavat ainekset voivat siirtyä paloalueelta toisaalle esimerkiksi putoamalla, vierimällä tai ilmavirtausten mukana. Maastopalo itsessään synnyttää voimakkaita lämpimiä ilmavirtauksia, joiden mukana palava aines voi siirtyä kauemmaksi varsinaisesta paloalueesta ja aiheuttaa uusia paloja. (Heikkilä ym. 2011, 19.) Massakulkeutuminen on maastopaloissa yleisin lämmön siirtymistä aiheuttava tekijä (Heikkilä ym. 2010, 87).



## 5 ILMASTONMUUTOS JA MAASTOPALOT

### 5.1 Ilmastonmuutoksen vaikutukset säähän ja ilmastoon

Ilmastonmuutos on ihmisen toimintaan liittyvä ympäristömuutos, josta merkkejä on ollut havaittavissa jo pitkään. Suomessa ilmastonmuutoksen vaikutukset ovat olleet nähtävissä erityisesti 2000-luvulla. Ääriolosuhteiden lisääntyminen ja säätilojen äkilliset vaihtelut ovat tuottaneet Suomeen erittäin voimakkaita sateita ja rajuja myrskyjä. Keski-Eurooppaa ja Pohjoismaita koetelleet pahat tulvat ovat lisääntyneet. Ilmastonmuutoksessa on kyse maailmanlaajuisesta ongelmasta, vaikka se ei olekaan ollut yhteisesti hyväksytty ja ymmärretty käsite vielä pitkään. Epäilevästi asiaan suhtautuvia löytyy poliittisten päättäjien kuin myös tutkijoidenkin keskuudesta. (Holopainen, Vapaavuori & Riikonen 2005, 4; Saukkonen 2020, 7.)

Ilmastonmuutos on seurausta ihmisen toimista, jotka lisäävät hiilidioksidin ja metaanin sekä muiden kasvihuonekaasujen määrää ilmakehässä. Fossiilisten polttoaineiden käyttö on pääsyy kasvihuonekaasujen lisääntymiseen ilmakehässä. Myös metsien hakkuut ja muutokset maankäytössä vaikuttavat kasvihuonekaasujen määrään. Metaanin määrä on kaksinkertaistunut ja hiilidioksidin määrä on 1,3-kertainen verrattuna aikaan ennen teollista vallankumousta. Kasvihuoneilmiö voimistuu, kun ilmakehän kyky vähentää maanpinnan säteilemän lämmön heijastumista avaruuteen heikkenee. Tämä aiheuttaa ilmaston lämpenemistä ja muuttumista. Samalla ilmakehän tärkeimmän luontaisen kasvihuonekaasun vesihöyryn pitoisuus ilmakehässä kasvaa. (Jylhä, Ruosteenoja & Tuomenvirta 2005, 21.)

Kuluvalle vuosisadalle on laadittu ilmastomallikokeiden tuloksia analysoimalla tulevaisuuden näkymiä siitä, miten Suomen ilmasto tulee muuttumaan. Sateisempaa ja lämpimämpää säätä on odotettavissa. (Jylhä, Ruosteenoja & Tuomenvirta 2005, 21.) Säännöllinen lämpötilamittaus aloitettiin Suomessa vuonna 1844. Puolet mittaushistorian lämpimimmistä vuosista ajoittuu 2010-luvulle. Suunta on ollut sama 1990-luvulta lähtien (Saukkonen 2020, 7.) Leudot talvet yleistyvät ja kylmät talvet käyvät harvinaisemmiksi. Talviset vesisateet

voimistuvat ja lisääntyvät ja lumen keskisyvyys jää alle puoleen nykyisestä. (Jylhä ym. 2005, 21.)

Pohjoisten havumetsävyöhykkeiden ekosysteemeille ilmaston muuttuminen ei ole uusi asia. Satojen tuhansien vuosien kuluessa nämä ekosysteemit ovat joutuneet sopeutumaan erilaisiin, paikoin dramaattisiinkin ilmastonmuutoksiin. Ekosysteemit ovat selvinneet, monesti muuttuneina. Suomen metsien puiden kasvu tulee kiihtymään sademäärän, lämpötilan ja hiilidioksidimäärän nousun takia. Puulajisuhteet voivat muuttua ja metsien herkkyys erilaisille häiriötekijöille voi kasvaa. Muutos ei todennäköisesti ole nopea, johtuen pohjoisten metsien hitaasta kehityksestä. Muutosnopeus metsäluonnossa on myös hidasta. (Davis, Shawn & Etterson 2005, 1707–1710; Keto-Tokoi & Kuuluvainen 2011, 281–282)

Ilmastonmuutoksen vaikutus maastopalovaaran ei ole täysin itsestäänselvä. Lämpötilan kasvaessa maastopalovaara kasvaa, kun taas lisääntyvä sateisuus laskee paloriskiä. (Mäkelä 2015, 35.) Ilmastonmuutoksen ennustamisessa uusimman suuntauksen tarkoituksena on kytkeä toisiinsa kasvillisuusmallit, valtameri- ja vesistömallit ja ilmakehämallit yhdeksi kokonaisuudeksi. Tarkoituksena on saada tarkempia ennusteita ilmastonmuutoksen vaikutuksista. (Jylhä ym. 2005, 28.) Maastopalojen on myös tutkittu vaikuttavan hillitseväenä tekijänä ilmaston lämpenemiseen. Maastopalojen savut lisäävät auringon säteilyn heijastumista takaisin avaruuteen. (Meriläinen-Tenhu 2017.)

## 5.2 Ilmastonmuutos ja maastopalot Suomessa

Ilmastonmuutoksen vaikutuksia eri alueiden ilmastoon ja sääoloihin tulevaisuudessa voidaan ennustaa käyttäen erilaisia päästöskenaarioita. Päästöskenaarion SRES A1B pohjalta on laadittu ennusteet ajanjaksoille 2010–2029 ja 2080–2099 siitä, miten mahdolliset maaston palamiseen otolliset päivät lisääntyvät ilmaston muutoksen vaikutuksesta Suomessa. Aiemmalle ajanjaksolle, 2010–2029, ennustuksen mukaan Suomen kesien keskilämpötila nousee 1,5°C, ja myöhemmän ajanjakson, 2080–2099, kesien keskilämpötila tulee nousemaan 4°C. Lämpenemisen takia maastopalon mahdollistavien päivien määrän on ennustettu kasvavan aiemmalla ajanjaksolla 56–75

prosenttia. Ajanjaksolla 2080–2099 maastopalon mahdollistavien päivien määrän on ennustettu kasvavan 71–91 prosenttia. Molemmissa estimaateissa vertailukohtana on käytetty vuosien 1961–1990 ilmasto- ja sääolosuhteita. Maastopalon mahdollistavien päivien lisääntyminen on ennusteen mukaan todennäköisintä Pohjois-Suomessa ja vähiten todennäköistä Itä-Suomessa (Centre for Climate Adaptation 2020b).

Ilmastomallien tulokset antavat melko lailla erilaisia tuloksia, johtuen mallien puuteellisuudesta ja erilaisista päästöskenaarioista sekä luonnollisesta vaihtelusta. Ilmastojärjestelmässä esiintyy välillä kaoottistakin vaihtelua, jota ei voi ennustaa. Käytettävien laitteiden kehittyessä, ja ilmaston käyttäytymisen tuntemisen oppimisen avulla tulevaisuuden ennusteet tulevat olemaan nykyisiä ennusteita tarkempia. Ilmastojärjestelmästä voi löytyä vielä tuntemattomia tekijöitä, joiden vaikutuksia ei vielä tiedetä. Monen mallin keskiarvojen perusteella kolmenkymmenen vuoden ajanjakson sademäärä ja keskilämpötila muuttuvat melko tasaisesti. (Jylhä ym. 2005, 28.)

Risk of large-scale fires in boreal forests of Finland under changing climate - tutkimuksessa tutkijat pitävät mahdollisena suurten maastopalojen määrän jopa kaksin- tai kolminkertaistuvan Suomessa kuluvaan vuosisadan loppuun mennessä (Lehtonen, Venäläinen, Kämäräinen, Peltola & Gregow 2015, 250). Suomen ilmasto ei suojaa suurilta maastopaloilta. Viimeisen sadan vuoden aikana suurille maastopaloille suotuisia olosuhteita on ollut useita kertoja. Lähes vuosittain Etelä-Suomessa esiintyy yksittäisillä paikkakunnilla suurpaloon vaadittavat olosuhteet. Keski-Suomessa vastaavia olosuhteita esiintyy noin joka kolmas vuosi, ja Pohjois-Suomessa noin kymmenen vuoden välein. Suurille maastopaloille otolliset säätilanteet ja olosuhteet lisääntyvät ilmastomuutoksen myötä. (Venäläinen, Lehtonen & Mäkelä 2016, 26–27.)

### 5.3 Ilmastomuutos ja maastopalot Ruotsissa

Keskitason A1B ilmastomuutosskenaarioon ja paikallisiin ilmastomalleihin perustuvissa tulevaisuuden projektioissa pohjoiselle Ruotsille sekä Etelä-Ruotsille on laadittu omat ennusteet. Ennusteiden mukaan Pohjois-Ruotsi on

vuoteen 2100 saakka tulelle vastustuskykyinen tulevaisuuden ilmasto-olojen vallitessa. Maastopaloihin suotuisia päiviä tulee ennusteen mukaan olemaan jopa vähemmän kuin 2020-luvulla. Etelä-Ruotsissa maastopaloille otolliset päivät lisääntyvät. Pohjois-Ruotsissa erityisesti syksy tulee olemaan ennusteiden mukaan tulelle altista aikaa lämpötilan noustessa ja tuulen nopeuden kasvaessa. Tulevaisuudessa kesäisin ennustettu kosteampi ilma, lisääntyvä sadanta ja suhteellisen vakaat tuuliolosuhteet tasapainottavat lämpimämmän ilman vaikutusta. (Centre for Climate Adaptation 2020c.)

Etelä-Ruotsissa maastopaloille otollisin aika on ennusteiden mukaan edelleen kesäisin. Vähäisempi sadanta, korkeampi lämpötila ja kovemmat tuulet pitävät ennusteiden mukaan maastopaloriskin korkeana kesällä. Vuoteen 2100 mennessä maastopaloriskin oletetaan kasvavan 20 prosentilla kesäaikana. (Centre for Climate Adaptation 2020c.)

#### 5.4 Ilmastonmuutos ja maastopalot Venäjällä

Lähes kaksi kolmasosaa boreaalisen havumetsävyöhykkeen metsistä sijaitsee Venäjällä. Boreaaliset havumetsät ovat merkittävä hiilinielu ja näiden metsien palaminen kasvattaisi hiilidioksidin määrää ilmakehässä. Tulevaisuudelle ennustetut pitkät kuivat jaksot pidentävät maastopalokautta ja lisäävät palojen intensiivisyyttä. (Goldammer & Stocks 2000, 49–50.) Mallilaskelmien perusteella maastopalojen riskin odotetaan kasvavan Venäjän eteläisillä leveysasteilla 2000-luvun loppuun mennessä. Maastopaloriski kasvaa korkeaksi tai vieläkin suuremmaksi Venäjän Euroopan puoleisten alueiden eteläosissa ja läntisessä Siperiassa. Mahdollisuus maastopaloihin voi kasvaa 20–60 prosenttia. (Centre for Climate Adaptation 2020d.)

## 6 MAASTOPALOJEN MALLINTAMINEN

### 6.1 Mallinnusmenetelmät

Maastopalojen palo-olosuhteiden ja palojen käyttäytymismekaniikkaa on tutkittu suomalaisessa metsätaloudessa vähän. Tutkimustiedon puute suomalaisista talousmetsistä johtaa vaikeuksiin luonnonhoitotarkoituksissa tehtäviin kulotuksiin ja ennallistamispolttoihin, epäoptimaaliseen resurssien käyttöön palojen valvonnassa sekä sammutustyössä. (Tanskanen 2007, 11.) Erilaisia mallinnusmenetelmiä on kehitetty maissa, joissa maastopalot ovat jatkuva ongelma. Yksinkertaisimmissa malleissa ohjelmat laskevat palon leviämistä solusta toiseen, perusteenaan viereisen solun palaminen. Monimutkaisimmat mallit vaativat erittäin tehokkaan laitteiston kolmiulotteisten ilmassojen, fysiikan eri näkökulmien ja energian siirtymisen mallintamiseksi. (Kolstela 2020a, 1, 3.)

Mallinnusohjelmistoja on erilaisia eri käyttötarkoituksia varten. Operatiivisessa toiminnassa ohjelmistoilta vaaditaan nopeutta ja tarkkuutta, koska paloja pyritään sammuttamaan ja niiden leviämistä pyritään ehkäisemään. Tutkimuksellisissa tarkoituksissa käytettäviltä ohjelmistoilta vaaditaan tutkimusten tulosten tarkkuutta. Yksinkertaisimmillaan mallien ääripäävät ovat empiiriset mallit ja fysiikan lainalaisuuksiin perustuvat mallit. (Kolstela 2020a, 14.)

Operatiivisessa käytössä olevat ja siihen tarkoitettut maastopalon leviämistä kuvaavat mallit ovat joko osittain tai kokonaan empiirisiä. Empiiriset mallit hyödyntävät oletuksia ja perustuvat todellisten palojen mittaustuloksiin ja lukuisiin koepolttoihin. Empiirisillä malleilla suurtenkin palojen mallintaminen todellista palon etenemistä nopeammin perustuu erittäin tehokkaaseen laskentaan. (Tymstra, Bryce, Wotton, Taylor & Ormitage 2010, 1–2.) Empiiristen mallien heikkous on niiden kykenemättömyys huomioida riskejä, jotka syntyvät poikkeusoloissa. Suurten ja korkean intensiteetin palojen tiedetään muodostavan oman ilmastonsa. Tällaisessa ilmastossa voi syntyä muun muassa vaarallisia tulipyörteitä, joita empiiriset mallit eivät voi ennalta ilmaista. (Heikkilä ym. 2011,

23, 26.) Tarkkaa mallinnusta haluttaessa tulisi olosuhteiden ja muuttujien oltava täsmälleen samanlaiset kuin mitä empiiristä mallia laadittaessa on käytetty.

Fysiikkaan perustuvissa malleissa mallinnukseen otetaan huomioon myös palon leviämisen fyysisiä mekaniikkoja, joita ovat esimerkiksi turbulenssiefektit, lämpösäteily ja konvektio. Maastopaloissa kyseiset mekaniikat esiintyvät muun muassa lämmön säteilynä ilmaan, palamisreaktiossa syntyneinä kuumina kaasuina ja palavan aineksen pyrolyysin säteilynä ja lämmön johtumisena. (Baines 1990, 92–94.)

Kolmiulotteisissa kuljetusmalleissa maastopalon leviämisen mallintamiseen otetaan mukaan tuli ja sen muokkaama paikallinen paloilmasto. Laskennallisesti kolmiulotteiset kuljetusmallit ovat raskaita käyttää, eivätkä ne sovellu ihanteellisesti operatiiviseen käyttöön. (Tymstra ym. 2010, 9–10, 14.) Lapin pelastuslaitoksella ei ole käytössään mallinnusohjelmia. Pelastuksen johtamisjärjestelmästä toimintaan saadaan kartat ja tuulen suunnat, mutta tiedon prosessoiminen on kulloisenkin tilannepaikkajohtajan henkilökohtaisen osaamisen varassa. Kiinnostusta maastopalon kehitystä luotettavasti ennustavaan ohjelmistoon pelastuslaitoksella kuitenkin on. (Aarto 2020.) Tulevaisuudessa kolmiulotteisten mallien käyttäminen myös operatiivisessa käytössä voi olla mahdollista tietokoneiden laskentatekniikan kehittyessä.

Sisäministeriön pelastusosaston mukaan Suomessa ei ole yhteisessä käytössä olevaa palojen leviämistä kuvaavaa mallinnusohjelmaa. Erilaisia kokeiluja ja demoversioita on tehty muun muassa Propagator-ohjelmistolla, liittyen Euroopan Unionin Anywhere -projektiin. Suomessa maastopalojen leviämismallinnukset tehdään pääsääntöisesti siinä tilanteessa ja hetkessä, mikä parhaillaan on käynnissä. Säätila, maaston muoto, palava aines, pelastustoiminnan johtajan koulutus, osaaminen ja kokemus ovat päätöksentekoperusteina maastopalotilanteissa. Tekoälyyn perustuvista mallinnusmenetelmistä on käyty keskusteluja. (Ruuska 2020.)

## 6.2 Maastopalojen leviämisen mallintamiseen tarvittavat tiedot

Keskeisimmät maastopalojen leviämisen mallintamiseen tarvittavat tiedot ovat ominaisuustiedot metsästä ja sää tiedot. Tavoitteena eri ohjelmistoissa on kuvata alueella olevan aineksen palo-ominaisuuksia ja vaihtelevuutta mahdollisimman tarkasti. Paikallisia sää tietoja käytetään palavan aineksen kosteuden ja tulen leviämisen mallintamisessa. Hilamuotoisina tietoina, kuten GeoTIFF-, ASCII, tai eroteltuna tekstitiedostona (.txt) kuvataan yleensä metsien ominaisuustietoja. Vektorimuotoisina Shapefile-tiedostoina kuvataan mahdollisia fyysisiä esteitä, esimerkiksi vesistöjä ja teitä. Sää tiedot ovat yleensä taulukkomuotoisena, eroteltuna tekstinä (.csv, .txt). Huomioitavaa on, että kaikkien hila tiedostojen tulee olla samassa projektiossa, samalla laajuudella ja samassa resoluutiossa keskenään. (Kolstela 2020b, 3–4.)

Useissa maastopalon leviämistä mallintavissa ohjelmistoissa on myös mahdollista käyttää esimerkiksi Maanmittauslaitoksen tuottamaa korkeusmallia, Ilmatieteen laitoksen tuottamaa sää dataa ja todellisten maastopaloalueiden syttymispiste- ja paloalatie toja. Kymmenen metrin resoluution korkeusmalli on saatavilla koko Suomen alueelta ja paikoin on saatavilla korkeusmalli kahden metrin resoluutiolla. Kymmenen metrin resoluutiolla oleva malli riittää Suomen oloissa maastopalon etenemisen mallintamiseen. Ilmatieteen laitoksen tuottamaa sää data paloalueen lähimmistä sää asemista koostuu ilman lämpötilasta, sademäärästä, tuulen suunnasta ja nopeudesta ja ilman suhteellisesta kosteudesta. (Kolstela 2020b, 4.)

Maastopalon leviämisen mallintamisessa metsäpaloindeksiä käytetään osana useiden palojen leviämistä kuvaavien ohjelmistojen toimintaa. (Tymstra ym. 2010, 20–22). Palo indeksejä on erilaisia. Niiden yleiset oletustiedot ja matemaattiset laskentamallit voivat poiketa toisistaan, mutta palo indeksien yleinen tavoite on sama. (Kolstela 2020a, 18.) Mahdollisen maastopalon odotettavissa oleva voimakkuus ja palon syttymisherkkyys määrittäminen ovat palo indeksien antaman tiedon yleinen tavoite. (Ilmatieteen laitos 2020c). Pelastuslain 31 § (379/2011) mukaan Ilmatieteen laitos on velvollinen antamaan

metsäpalovaroituksen alueille, joissa maanpinnan kuivuuden ja sääolosuhteiden vuoksi metsäpalon vaara on ilmeinen (Pelastuslaki 379/2011 4:31§).

Suomessa käytössä oleva metsäpaloindeksi perustuu laskentamalliin ja säähavaintoihin, joiden avulla metsämaan kuivuutta arvioidaan. Puustoisia alueita nopeammin kuivuvat puoliavoimet ja puuttomat alueet edustavat herkimmin syttyvää maastotyyppiä. Tästä syystä laskentamallissa lasketaan humuksen pintakosteus puoliavoimille ja puuttomille alueille. Ilmatieteen laitoksen mallissa pintakosteus lasketaan 3 senttimetrin ja 6 senttimetrin paksuisille kerroksille. Ruohikkopaloindeksin laskennassa käytetään ohuemman kerroksen vaihtoehtoa, ja metsäpaloindeksin laskennassa käytetään paksumpaa, 6 senttimetrin kerrosta. (Ilmatieteen laitos 2020.)

Euroopan Unionin metsäpalovaroitusjärjestelmänä käytetään kanadalaista Canadian Forest Fire Danger Rating System -indeksijärjestelmän FWI-järjestelmää. Toinen Canadian Forest Fire Danger Rating System -indeksijärjestelmän alajärjestelmä on FBP-järjestelmä, jota käytetään maastopalon käyttäytymisen ennustamiseen. (Kolstela 2020a, 19–20.) Kanadalaisen FWI-järjestelmän tavoite on sama kuin Ilmatieteen laitoksen järjestelmässä, mutta FWI-järjestelmässä on kuusi eri indeksiä, joiden perusteella metsäpaloriskiä lasketaan. Hienoaineksen kosteus lasketaan noin 1,2 senttimetrin syvyydestä, pohjakerroksen kosteus 7 senttimetrin syvyydestä ja kangashumuksen kosteusindeksi lasketaan 18 senttimetrin syvyydestä. Järjestelmän kolme muuta osaa ovat tulen leviämisindeksi, potentiaalinen palokuormaindeksi ja paloindeksi. (Van Wagner 1974, 3–4; Kolstela 2020a, 20.)

### 6.3 Leviämisen mallintamismenetelmät

Mallinnettaessa leviämistä käytetään yleisesti kahta eri menetelmää. Soluautomaatti on yksinkertaisempi malli, jossa esimerkiksi maastopalon leviämistä lasketaan ohjelmistossa solujen avulla. Toinen malli on laskennallisesti vaativampi vektorietenemismalli, joka pohjautuu Huygensin aallon etenemisen periaatteisiin. (Tymstra ym. 2010, 6–14; Kolstela 2020a, 16.)

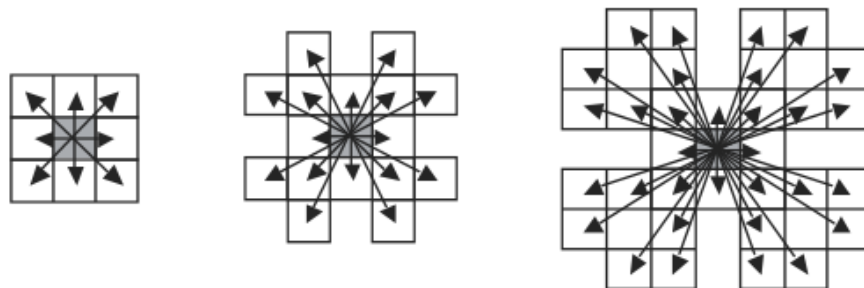


### 6.3.1 Soluautomaatti

Teoreettisesta näkökulmasta soluautomaattimalleissa on neljä päätekijää, joilla on tärkeä merkitys mallinnuksessa. Soluautomaatin neljä päätekijää ovat solun tila, mallin fyysinen ympäristö, paikallinen siirtymäsääntö ja solujen naapurusto. Solulla voi olla vain yksi tila, jonka tämänhetkistä tilaa kuvataan arvolla, joka on numeerinen. Solun mahdolliset tilat voivat esimerkiksi maastopalon leviämistä kuvattaessa olla:

- 3 = palanut solu
- 2 = palava solu
- 1 = ei palavan aineksen solu
- 0 = palamaton solu. (Quartieri, Mastorakis, Iannone & Guarnaccia 2010, 174–175.)

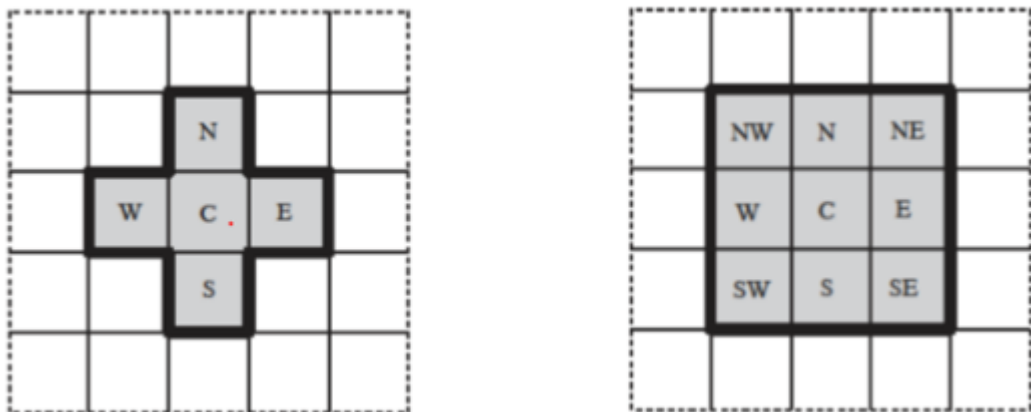
Soluautomaattimallien fyysisen ympäristön perustana on soluista koostuva hilaruudukko. Solut ovat nelikulmaisia tai kuusikulmaisia. Jokaisella solulla hilaruudukossa on tietty tila, joka määritetään soluautomaatin käyttötarkoituksen mukaisesti. (Quartieri ym. 2010, 174.) Luonnonilmiöitä mallinnettaessa edellä kuvattu toimintamalli ja toimintaympäristö ovat yleisesti käytössä. Tulen leviämistä kuvaavissa sovelluksissa polttoaineen ja maaston oletetaan olevan samanlainen joka solussa. Mallinuksissa tuli leviää hilaruudukossa tyypillisesti solun keskeltä solun keskelle. Tuli tai muu luonnonilmiö voi levitä varjostetuista soluista varjostamattomiin soluihin 8:aan, 16:een tai 32 suuntaan (Kuvio 11). Jokainen syttynyt solu käyttäytyy kuin se olisi syttymisen aiheuttaja, ja on näin ollen itsenäinen viereisiin palaviin soluihin nähden. (Tymstra ym. 2010, 6.)



Kuvio 11. Viereisyysmalli 8-, 16- ja 32-pisteisille soluautomaateille (Tymstra ym. 2010, 6)

Jokaiselle solulle määritetty paikallinen siirtymäsääntö määrittelee mahdollisen muutoksen, joka soluissa tapahtuu jokaisen aika-askeleen kohdalla. Muutos voi olla todennäköisyyteen perustuva tai syy-seuraussuhteen määrittämä ketju, joka määrää kaikki tapahtumat. Tietyn solun naapuruston tila tarkistetaan aina uuden aika-askeleen kohdalla ja jos naapurustossa palaa solu, todennäköisyydellä myös solu X syttyy palamaan. Tarpeeksi monen aika-askeleen jälkeen solu sammuu. Solun syttymistodennäköisyystekijöitä voivat olla esimerkiksi tuulen suunta ja palavan aineksen tyyppi. (Quartieri ym. 2010, 175; Kolstela 2020a, 16.)

Yksittäisen solun läheisyydessä olevia soluja kutsutaan solujen naapurustoksi. Toinen yleisesti käytetyistä solujen naapurustoista on Mooren naapurusto (Kuvio 10), jossa solulla on kahdeksan naapurisolua. Yksi naapurisolua jokaisessa ilmansuunnassa. Von Neumannin (Kuvio 12) naapurusto on toinen yleisesti käytetty naapurusto, jossa yksittäisellä solulla on naapurisolua jokaisessa pääilmansuunnassa eli neljä naapurisolua. Solujen naapurustojen tulee olla samanmuotoisia. (Quartieri ym. 2010, 174–175.)

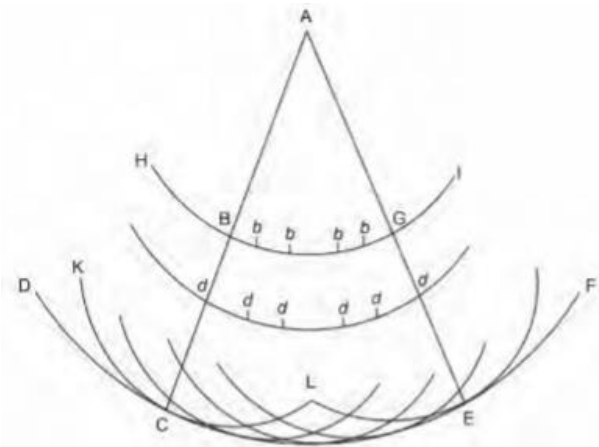


Kuvio 12. Kaksi yleisesti käytettyä kaksikulotteista soluautomaattinaapurustoa, oikealla Von Neumannin naapurusto ja vasemmalla Mooren naapurusto (Quartieri ym. 175.)

### 6.3.2 Vektorietenemismalli

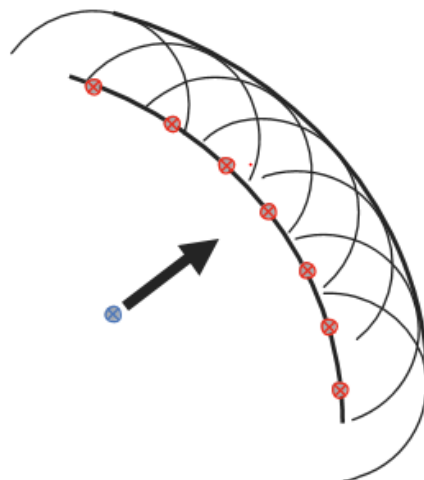
Toinen täysin erilainen lähestymistapa tulen leviämisen mallintamisessa on vektorietenemismalli, joka perustuu Christiaan Huygensin (1690) havaintoihin (Kuvio 13) valoaaltojen etenemisestä (Tymstra ym. 2010, 11). Jokainen

valoaaltorintaman piste on lähtöpiste uudelle pienemmälle aallolle, ja uudet pienemmät aallot synnyttävät uuden aaltorintaman. (Tymstra ym. 2010, 11; Kolstela 2020a, 17).



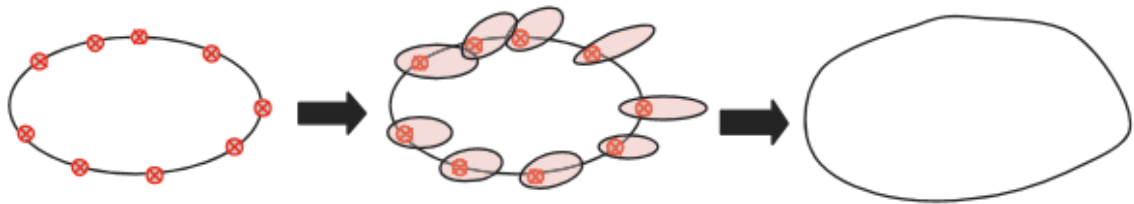
Kuvio 13. Valoaaltojen eteneminen Huygensin mukaan (Tymstra ym. 2010, 11)

Kuviossa 13 pääaalto DCEF säteilee pisteestä A. Toissijainen aalto KCL säteilee pisteestä B ja on kosketuksessa aaltoon DCEF pisteessä C. Pääaalto HBGI säteilee myös pisteestä A. Pistelähteet b ja d luovat myös omat sekundääriset aaltonsa. Huygensin periaatteen mukaan uusi aaltorintama (Kuvio 14) muodostuu keskipisteestä, jota kuvassa esittää sininen ristikoitu ympyrä. Musta nuoli kuvaa aallon etenemisen suuntaa, ja punaiset ristikoidut ympyrät ovat uusien sekundääristen aaltojen keskipisteitä. (Tymstra ym. 2010, 11–12.)



Kuvio 14. Uuden aaltorintaman muodostuminen Huygensin periaatteen mukaan (Tymstra ym. 2010, 12)

Vektorietenemismallissa (Kuvio 15) maastopalon leviämistä mallinnetaan niin, että lähtötilanteen polygonille valitaan paloa levittävät pisteet. Jokaisen pisteen paloaines- ja sää tietoihin perustuvan tiedon pohjalta lasketaan maastopalon leviämisen laajuus ja lopuksi muodostetaan uusi palorintama. Tätä tapahtumaa toistetaan, kunnes kaikki kärjet kohtaavat ylitsepääsemättömän esteen tai kesto, joka simulaatiolle on määritetty, päättyy. (Tymstra 2010, 12–14).



Kuvio 15. Maastopalon leviämisen eteneminen vektorietenemismallissa (Tymstra ym. 2010, 12)

Palon leviämisen mallintamisessa edellä kuvattua säteilymallia on käytetty esimerkiksi Kanadalaisessa Prometheus-ohjelmassa, jossa suorat viivat muodostavat polygonin, joka kuvaa palorintamaa. Palon leviämistä polygonin kärjistä lasketaan ellipsin muotoisina alueina. Maastopalon oletettu leviämisenopeus, tuulen suunta ja voimakkuus määrittävät ellipsien koon suunnan. Prometheusessa syttymispiste voi olla polygoni-, viiva- tai pistemuotoinen. Syttymispisteen ympärille muodostettavan polygonin muodon määrää syttymispisteen muoto. Muodostetun polygonin ympäriltä valitaan polygonien kärjet, joille lasketaan omat maastopalon käyttäytymistä määrittävät arvot. Polygonin kärkien paikan ja määrän määrittää ensimmäiseksi muodostetun polygonin muoto. (Tymstra ym. 2010, 11–14; Kolstela 2020a, 17, 27–28.)

#### 6.4 Maastopalon mallintamisen esimerkkiohjelmat

Maastopalojen mallintamiseen käytettyjä ohjelmistoja on kehitetty jo pitkään. Kanadassa kehitystyö maastopalojen leviämisen mallinnuksessa matemaattisten mallien avulla alkoi jo 1920-luvulla. Tutkijat alkoivat käyttää 1970-luvulla tietokonesimulaatiotekniikoita maastopalojen kasvun mallinnuksessa maisemamittakaavassa. (Tymstra ym. 2010, 1.) Yhdysvaltalaisen BEHAVE-ohjelman kehitystyö aloitettiin jo 1977 ja kenttäkäyttöön ohjelma valmistui vuonna

1984. (Andrews 2014, 21). Kanadalaisen Prometheus-ohjelman kehitystyö alkoi vuonna 1999 (Tymstra ym. 2010, 1).

Erilaisia ohjelmistoja on paljon ja niiden toimintaperiaatteet eriävät toisistaan. Pastor, Zarate, Planas & Arnaldos (2003) mainitsivat artikkelissaan 20 maastopalon leviämisen mallintamiseen kykenevää ohjelmaa. Samassa artikkelissa he listasivat 68 eri palonleviämismallia, joita ohjelmat hyödyntävät. Pastorin ym. (2003) mukaan eri mallit voidaan luokitella kolmeen isompaan ryhmään, joiden mää rä äviä tekijöitä ovat mallinnettava fysiikka, tutkittavat muuttujat ja laskentamallit. (Pastor, Zarate, Planas & Arnaldos 2003, 141–143).

#### 6.4.1 Prometheus

Prometheus on Kanadassa operatiiviseen käyttöön kehitetty ohjelma, jonka tarkoituksena on antaa riittävän nopeasti ennuste maastopalon käyttäytymisestä reaaliajassa. Muita ohjelmalle asetettuja vaatimuksia ovat ohjelman liittämismahdollisuus muiden ohjelmien toimintaan, kyky itsenäiseen toimintaan, auttaminen palontorjunnan vaikutusten arvioinnissa ja mahdollisen maastopaloalueen arvokkaiden kohteiden haavoittuvuuden mallintaminen. (Tymstra ym. 2010, 1–2; Kolstela 2020b, 5.) Prometheus on deterministinen maastopalon kasvun simulaatiomalli, joka perustuu Canadian Forest Fire Danger Rating Systemin alajärjestelmiin. Alajärjestelmiä ovat metsäpaloindeksi ja maastopalon leviämiskäyttäytymistä ennustava malli. (Prometheus 2019.)

Prometheus eli ohjelmistonimeltään PrometheusCOM, pohjautuu viiteen eri ohjelmistokomponenttimalliin eli COM:iin. COM on Microsoftin käyttöliittymissä perustoimintamalli binääriseen koodin jakamiseen eri sovellusten ja kielten välillä ilman varsinaisen lähdekoodin luovuttamista. COM-ympäristö mahdollistaa osittaisen ohjelmistomuokkauksen ilman lähdekoodia. (COM Programmer Documentation 2014.)

Suomessa tuotetaan eri tahojen toimesta laadukasta avointa dataa, jota voidaan hyödyntää Prometheus-ohjelman käytössä. Pakolliset Prometheus-ohjelmaan tuotavat tiedot ovat säätieto, tieto sääasemasta, paloaineshila ja

paloainestaulukko. Tiedot palon syttymisajankohdasta ja syttymissijainnista ovat myös vaadittavia tietoja. Sää- ja sääasema tiedot ovat saatavilla Ilmatieteen laitokselta, paloaineshila on saatavilla Maanmittauslaitokselta, Luonnonvarakeskuksesta tai Suomen metsäkeskuksesta. Ohjelma itsessään sisältää paloainestaulukon. Tiedot palon syttymisajankohdasta sekä sijainnista on saatavilla pelastuslaitokselta. Ohjelman tuottaman palon leviämisen mallintamisen tarkkuutta parantavat erilaiset lisäosat, esimerkiksi korkeusmalli ja fyysiset esteet, jotka estävät palon leviämisen. (Kolstela 2020a, 29, 57; Kolstela 2020b, 6–7.)

Prometheus-ohjelman tuottamasta tiedosta tärkein on vektoritiedosto, joka kuvaa maastopaloaluetta. Eri muuttujien taulukoituja arvoja on mahdollista tarkastella kyseisessä ohjelmassa. Palon leviämisen nopeutta, palavan alueen kokoa, palavan alueen kasvunopeutta ja liekin pituutta voidaan tarkastella ohjelman taulukkomuotoisista tiedoista. Prometheus-ohjelmalla ajatun mallin tulokset voidaan yhdistää esimerkiksi QGIS-paikkatietojärjestelmään paloalueen vektorina ja paloalueen tilastotietojen taulukoina. QGIS-paikkatietojärjestelmässä kaikki siirretyt tiedot voidaan yhdistää yhdeksi shapefile-tiedostoksi. (Kolstela 2020b, 16–18.)

Prometheus-ohjelmaa on kokeiltu Suomen metsäkeskuksen hallinnoimassa Mellevä-hankeessa. Hankkeen tavoitteena oli laatia demo, jonka avulla pyrittiin selvittämään millainen palvelu tukisi parhaiten pelastuslaitosten toimintaa maastopalojen torjunnassa. Tietolähteinä demossa käytettiin Ilmatieteen laitoksen ja Suomen metsäkeskuksen tuottamia palveluja. Hanke toteutettiin 1.3.2019–28.2.2020 välisenä aikana ja siihen osallistuivat Ilmatieteen laitoksen, Suomen metsäkeskuksen, Pohjois-Karjalan pelastuslaitoksen ja Arbonaut Oy:n edustajat. (Metsäkeskus 2020.) Kokeilun johtopäätöksenä Prometheus-ohjelma soveltuu käytettäväksi Suomen oloissa sellaisenaan, joskin sen käyttö pelastusviranomaisten käytössä vaatii vielä korjauksia ohjelman ja siihen saatavan datan kannalta (Kolstela 2020b, 26).

Prometheus-ohjelmasta on saatavilla kevyempi versio, joka hyödyntää PrometheusCOM-järjestelmää. Pandorassa ohjelmaan syötettävien tiedostojen

määrä on huomattavasti rajallisempi Prometheukseen verrattuna. Ohjelman käyttöä varten luodaan tekstitiedosto, johon käytettävien tiedostojen tiedostopolut ja asetukset syötetään. Pandoran etuna Prometheukseen verrattuna on sen käytön nopeus sekä kevyempi käyttöliittymä. Kaikkien tiedostojen tulee kuitenkin olla oikeassa laajuudessa ja resoluutiossa. (Kolstela 2020b, 30–31.)

#### 6.4.2 Burn-P3

Burn-P3 on simulaatiomalli, joka arvioi maastopalon mahdollisuutta tai todennäköisyyttä suurille, paloille alttiille alueille. Burn-P3 on kehitetty Prometheus-ohjelman rinnalla. Ohjelman käyttäjän antamien tiedostojen ja määrittelemien tietojen pohjalta Burn-P3 toimii toistaen samoja työvaiheita niin kauan, että haluttu lopputulos on saavutettu. (Burn-P3 2017, 5; Kolstela 2020b, 31.) Tietojenkäsittelyssä samojen työvaiheiden toistamista, yleistä silmukkarakennetta, kutsutaan iteraatioksi (Tilastokeskus 2020). Ohjelma määrittää jokaisen silmukkarakenteen kohdalla X syttymispistettä annetun todennäköisyshilan perusteella tai täysin satunnaisesti (Kolstela 2020b, 31). Syttymispisteissä maastopalon leviämistä mallinnetaan sää tietoa, hyväksi käyttäen maastopalon käyttäytymistä ennustavan järjestelmän tukea. (Parisien, Kafka, Hirsch, Todd, Lavoie & Maczek 2005, 3–5).

Burn-P3 ohjelman käyttäjä määrittää maastopalolle kestoajan maksimin sekä minimikoon. Sytytetyn maastopalon toteuttaessa minimikoon ja maksimikeston, merkitään maastopalon leviämismallin polttamiin soluihin tieto niiden palamisesta. Paloja sytytetään lisää, ja niiden polttamat solut merkitään määritettyjen silmukkarakenteiden mukaan. Tämän jälkeen palamistodennäköisyys lasketaan alueella oleville soluille. (Parisien ym. 2005, 7; Kolstela 2020a, 31.)

Burn-P3-ohjelma tuottaa laaja-alaisia palon todennäköisyyttä ennustavia karttoja. (Parisien ym. 2005, iii). Muita ohjelmalla tuotettavia tietoja ovat solujen palamisen todennäköisyyttä tai kunkin solun palamiskertoja kuvaava palotodennäköisyshila. Burn-P3 ohjelmalla lopullisen palaneen alueen koosta, alueen eri paloainesluokkien määrästä, syttymispisteiden sijainnista ja

syttymissyistä on mahdollista tuottaa taulukoitua tilastotietoa. (Kolstela 2020a, 32.)

Burn-P3-ohjelmaa on Suomessa kokeiltu Suomen metsäkeskuksen Mellevä-hankkeen yhteydessä. Mellevä-hankkeessa todettiin kyseisellä ohjelmalla onnistuneen maastopalon todennäköisyysmallin luomisen olevan erittäin haasteellista. (Kolstela 2020a, 35.) Burn-P3-ohjelmaa kuvataan myös erittäin raskaaksi käyttää. Alueen koko vaikuttaa mallin luomiseen ja tehokkaalla kannettavalla tietokoneella palotodennäköisyshilan luominen saattaa kestää useita tunteja. (Kolstela 2020a, 31.)

#### 6.4.3 Cell2Fire

Cell2Fire on soluperusteinen maasto- ja metsäpalon kasvun mallintaja. Ohjelmassa paloympäristö jaetaan lukuisiksi yhteneviksi soluiksi. Jokaiselle solulle määritetään palavan aineksen tyyppi, sää, palavan aineksen kosteuden ja maaston ominaisuudet. Palon leviämisen solujen sisällä oletetaan olevan elliptistä, jota ohjaa palon nopeutta ennustava mikä tahansa itsenäinen tulen leviämisen malli. Ohjelma käyttää hyväkseen rinnakkaisia laskentamalleja, joka antaa käyttäjälle mahdollisuuden suorittaa laaja-alaisia mallinuksia lyhyessä ajassa. (GitHub Inc. 2020.)

Ohjelmassa jokainen solu edustaa tiettyä osaa maastoalueesta, sisältäen kaksi tietotasoa topografian ja palavan aineksen ominaisuuksista. Nämä tietotasot määrittävät kunkin yksittäisen solun ominaisuudet, sallien mallintajan käsitellä soluja itsenäisinä kohteina, jotka voivat olla vuorovaikutuksessa muiden solujen kanssa. Solujen tila päivitetään jokaisen aika-askelen lopussa. Mitä pienemmät aika-askleet ovat, sitä tarkempaan ennusteeseen päästään. Soluilla voi olla yksi viidestä tilasta kerrallaan. Saatavilla oleva, palava, palanut, harvennettu ja ei-polttoaine ovat tilat, joissa solut voivat olla. (Pais, Carrasco, Martell, Weintraub & Woodruff 2019, 9–10.)

Saatavilla oleva tila ilmaisee solun sisältävän palavaa ainesta. Palava-tila edustaa tilaa, jossa solu on aktiivisessa palovaiheessa. Palanut-tilassa tuli on



kulkenut solun läpi polttaen sen. Harvennettu-tila edellytetään, jotta mallintaja voi sisällyttää strategisen harvennussuunnitelmajärjestelmän. Ei-polttoaine-tilassa olevat solut sisältävät palamatonta materiaalia, kuten kallioita tai vettä. Syttymispisteen määrittämisen jälkeen palo syttyy. Jokaisen aika-askeleen jälkeen palon on mahdollista levitä viereisiin soluihin, naapurustoihin. Cell2Fire-ohjelmassa solulla voi olla kahdeksan naapurisolua eli käytössä on Mooren naapurusto. (Pais ym. 2019, 10; Quartieri ym. 2010, 175.)

#### 6.4.4 BehavePlus

BehavePlus on yhdysvaltalainen Windows®-pohjainen palonmallinnusjärjestelmä. BehavePlus-ohjelmaa voidaan käyttää missä tahansa tulenhallintasovelluksessa, jossa tulen käyttäytymistä täytyy laskea. Järjestelmä koostuu kokoelmasta matemaattisia malleja, jotka kuvaavat tulen käyttäytymistä ja paloympäristöä. BehavePlus-järjestelmällä voidaan mallintaa tulen leviämisen nopeutta, palavan aineksen kulkeutumista ilmapirtojen mukana, palon korkeutta, puiden kuolleisuutta, palavan aineksen kosteutta ja tuulen vaikutusta. (Frames 2020.) BehavePlus-ohjelmassa käytetty palon leviämisen laskennan algoritmi pohjautuu Rothermelin (1972) kasvillisuuspolttoaineiden luokittelujärjestelmään sekä pintapalojen intensiteettiä ja niiden leviämisenopeutta kuvaavaan malliin. Rothermelin (1972) malli huomioi kokeellisten korrelaatioiden ja yksinkertaisten fysikaalisten mallien avulla maaston kaltevuuden, kosteusolosuhteet, tuulen ja palavan aineksen määrän ja laadun. (Hostikka, Mangs & Paloposki 2005, 1.)

BehavePlus on kehitystyön tulos aiemmasta BEHAVE-versiosta, jonka kehitys aloitettiin 1997. Kenttäkäyttöön BEHAVE-ohjelma otettiin 1984. BehavePlus-järjestelmää voidaan käyttää esimerkiksi maastopalon käyttäytymisen ennustamiseen, kulotusten suunnitteluun, tulen tutkimiseen, palavan aineksen uhka-arviointiin ja tutkimustyöhön. Andrews (2014) kirjoitti järjestelmän laajentamisen ja uusien tutkimustulosten tuomisen järjestelmään tulevan koko ajan yhä vaikeammaksi nykyisessä muodossaan. Uusin versio, BehavePlus 6.0.0 Beta 3 julkaistiin maaliskuussa 2018. (Andrews 2014, 21; United State Department of Agriculture, 2018.)

#### 6.4.5 MASIFIRE

MASIFIRE on Teknologian tutkimuskeskuksella kehitetty ohjelma, jossa digitaalisten karttojen avulla voidaan mallintaa maastopalojen leviämistä. Mallinuksissa otetaan huomioon paloympäristön pinnanmuodot, kosteus ja tuuliolosuhteet. Erilaisissa maastoissa etenevien pinta- ja maapalojen mallintaminen on ohjelman avulla mahdollista. Ohjelman pyrkimyksenä on myös ennustaa palon leviäminen rakennuksiin. MASIFIRE-ohjelmassa käytetty palon leviämisen laskennan algoritmi pohjautuu yhdysvaltalaiseen BEHAVE-malliin. BEHAVE-ohjelma perustuu Rothermelin (1972) kasvillisuuspolttoaineiden luokittelujärjestelmään sekä pintapalojen intensiteettiä ja niiden leviämisenopeutta kuvaavaan malliin. (Hostikka ym. 2005, 1.)

Matemaattisiin malleihin perustuvat yksinkertaiset ja osittain empiiriset mallit eivät kykene mallintamaan palorintaman kolmiulotteisuutta tai kasvillisuuden vaihtelevuutta. Jatkotutkimustarpeita MASIFIRE-ohjelmalle on muun muassa kasvillisuuskartoituksessa Suomen olosuhteissa. Metsien eri osien biomassasta, sen jakautumisesta eri kokoryhmiin ja biomassan kosteusoloista tarvitaan lisää palon simuloinnin kannalta oleellista tietoa. (Hostikka ym. 2005, 1, 8.)

#### 6.5 Pelastusviranomaisten näkökulma mallinnusohjelmiin

Maastopalojen torjunnan ja palojen leviämisen estämisen kannalta pelastusviranomaisten tarve leviämisenuste- ja päätöstukiohjelmistolle on kaksiosainen. Tilannekeskukselle tulisi olla oma ohjelmisto, joka pystyy käsittelemään suurta tietomäärää, karttoja, tietoa paloriskeistä, syttymisherkkydestä, polttoainekuormasta ja esimerkiksi tiedon paloalueen puiden alimpien oksien etäisyyden maahan. Tämä tieto auttaa latvapaloriskin arvioimisessa. Puulajitieto sekä puuston tiheys vaikuttavat palon leviämisen nopeuteen ja voimakkuuteen. Vedenottoaikkojen sijainti ja maastopalokohteen etäisyys lähimpiin teihin on myös tärkeä tarvittava tieto. Maastopalon sattuessa kaikki tarvittava tieto joudutaan keräämään monista eri tietolähteistä, jolloin mahdollisuus virhearviointeihin kasvaa, aikaa kuluu ja operatiivisen toiminnan

reagointinopeus palontorjunnassa hidastuu. (Leskinen, Ala-Honkola, Kauranne, Viertola & Ruusunen 2020, 3.)

Operatiiviseen toimintaan ja kenttäjohtoon sekä sammutustoimintaan tarvittavan ohjelmiston on oltava pelkistetty, yksinkertainen ja helppokäyttöinen sekä sellainen, jota voidaan käyttää johtoauton tietokoneella, tabletilla tai kännykällä. Liian monimutkainen ohjelma jää käyttämättä, koska siitä ei koeta olevan hyötyä, sitä ei osata käyttää tai sen käyttäjä unohtaa, miten ohjelma toimii. Maastopalojen sammutustyö tapahtuu usein hektisessä ympäristössä, eikä aikaa ole opetella ohjelman käyttöä tai analysoida siitä saatavia tietoja. Pahimmillaan liian raskas ohjelmisto voi kaataa johtoauton työaseman. Kuvapankki erityyppisistä metsiköistä koetaan myös hyödylliseksi. Kaikkien pelastusalan ammattilaisten tieto metsiköistä ja metsikkötyypeistä ei anna riittävää tietoa kyseisen kohteen ominaispiirteistä. (Leskinen ym. 2020, 3.)

Toimiakseen hyvin maastopalojen leviämistä mallintavat ohjelmistot vaativat tarkkaa tietoa sääennusteista ja tuuliolosuhteista. Yleinen sääennuste kertoo keskimääräisen tuulennopeuden ja tuulen suunnan suurilla alueilla, eikä se huomioi aukeiden alueiden tuulta voimistavaa tai tuulen suuntaa muuttavaa vaikutusta. Maaston muotojen vaikutus alueen tuulioloihin vaikuttaa suuresti. Hienohilainen tuulimalli vaatii tarkan tiedon palopaikasta ja runsaasti laskentatehoa laitteistolta. Maastopalon mallinnusohjelmaan sääennuste ja sen vaikutus palon leviämiseen ehdottomasti halutaan. (Leskinen ym. 2020, 4.)

## 7 POHDINTA

Opinnäytetyöni tavoitteena oli tutkia tekijöitä, jotka vaikuttavat maastopalojen syntymiseen ja niiden leviämiseen. Boreaalisen havumetsävyöhykkeen palavien ainesten itsesyttymistä ei tapahdu sillä palo vaatii aina ulkoisen syttymislähteen. Ihmisen asuttamilla alueilla palon aiheuttaja on useimmiten ihminen ja ihmisen toiminta. Jos alueilla ei ole ihmisvaikutusta, palon sytyttää salama. Maastopalojen leviämiseen vaikuttavat metsän palava aines, sen määrä, kosteus ja järjestyneisyys. Maaston muodot voivat kiihdyttää palamisen etenemistä tai estää palon etenemisen kokonaan. Sää vaikuttaa oleellisesti maastopalojen olemassaoloon ja leviämiseen. Vähäinen sadanta, korkea lämpötila, alhainen suhteellinen kosteus ja tuuli luovat otolliset olosuhteet maastopalojen intensiteetin kasvulle ja nopealle leviämiselle.

Ihmisen huolimattomuus, välinpitämättömyys, tietämättömyys ja kyvyttömyys ymmärtää tulen käyttäytymistä eri tekijöiden toimesta näyttää olevan syy siihen, miksi ihminen omalla toiminnallaan maastopaloja aiheuttaa. Yhteistä Suomen, Ruotsin ja Venäjän Euroopan puoleisten maastopalojen olemassaololle on se, että ihminen aiheuttaa omalla toiminnallaan valtaosan näistä maastopaloista. Metsä- ja ruohikkopalovaroituksen aikana asiasta tiedotetaan ja tulen tekemistä kehoitetaan välttämään. Tästä huolimatta maastopaloja syttyy tai sytytetään tarkoituksellisesti. Itse en muista kohdanneeni valistuskampanjoita, joissa maastopaloista ja niiden syttymisestä tai leviämisestä olisi erityisesti tiedotettu.

Boreaalisen havumetsävyöhykkeen maastopalojen palava aines koostuu sammalista, heinistä pensaista ja puista. Maastopaloissa palavan aineksen koko ja tyyppi ratkaisevat sen, miten tuli palaa. Palon voimakkuuden ja etenemisnopeuden kannalta palavan aineksen järjestäytyneisyys ja sijainti ovat merkityksellisiä tekijöitä. Palokuorman eli palavan aineksen hehtaarikohtainen määrä määrittää maastopalon voimakkuutta ja palon tuottamaa kuumuutta. Helppo muistisääntö palokuormasta ja palon voimakkuudesta on se, että jos palavan aineksen määrä kaksinkertaistuu myös liekkien korkeus tuplaantuu ja palon etenemisnopeus kaksinkertaistuu.

Suomen metsien biodiversiteetin vähenemisestä käydään keskustelua ja on ehdotettu, että hakkuiden yhteydessä metsään jätettävän puuston määrää on lisättävä. Eri-ikäisrakenteisen metsän kasvatusmenetelmää on lakialoitteen muodossa vaadittu valtion metsien pääasiallisesti metsienkäsittelyratkaisuksi. Edellä mainittujen skenaarioiden toteutuessa myös metsien palavan aineksen määrä tulee lisääntymään. Voidaanko olettaa tällaisille alueille osuvien maastopalojen olevan voimakkaampia, kun palavaa ainesta on enemmän? Jatkotutkimuksissa jatkuvan kasvatuksen ja jaksollisen kasvatuksen metsien palokuormien vertaileminen olemassa olevan metsävaratiedon pohjalta voisi olla kiinnostava tutkimuskohde.

Suomessa maasto on pääosin helppokulkuista ja laajan metsäautotieverkoston mahdollistamana maastopalojen sattuessa paloalueen lähialueille päästään suhteellisen helposti. Maaston muodot vaikuttavat maastopalon leviämiseen ja käyttäytymiseen. Suomen metsien mosaiikkimaisuus ja luonnollisten esteiden olemassaolo pilkkoo metsät osiin. Suurten yhtenäisten alueiden maastopalomahdollisuus pienenee. Suomen erämaa-alueet sijaitsevat Pohjois-Suomessa, muodostaen laajoja, asumattomia, tiettömiä alueita, joissa maastopalon sattuessa sammutuksen järjestäminen voi olla vaivalloista. Onko näissä kohteissa lentosammutus ainoa vaihtoehto palojen sammuttamiseen tai rajaamiseen, vai annetaanko maastopalojen palaa ja sammua omia aikojaan?

Sää ja siihen liittyvät ilmiöt vaikuttavat maastopalojen esiintymiseen ja leviämiseen. Sateen ajankohta ja määrä, ukkonen, lämpötila, tuuli ja ilman suhteellinen kosteus vaikuttavat palon leviämiseen ja palon voimakkuuteen. Epävarmuutta tulevaisuuden säähän ja ilmastoon aiheuttaa ilmastonmuutos, jonka kaikkia vaikutuksia ei vielä tiedetä. Suomen ilmasto ei suojaa suuriltakaan maastopaloilta, ja todennäköisten maastopaloapäivien määrän oletetaan lisääntyvän kuluvan vuosisadan loppuun mennessä.

Tietokonepohjaisia mallinnusohjelmia on kehitetty maissa, joissa maastopalot ovat jatkuva uhka. Ohjelmilla pyritään ennustamaan palojen käyttäytymistä ja leviämistä. Jatkotutkimuksissa voitaisiin perehtyä tarkemmin itse ohjelmistoihin ja niiden toimintoihin sekä kykyyn mallintaa mahdollisia maastopaloja ja niiden

leviämistä. Monet ohjelmat ovat vapaasti ladattavissa ja Suomesta löytyy useita lähteitä, jotka tuottavat laadukasta dataa mallinnusohjelmistoissakin käsiteltäviksi.

Perehtyessäni ohjelmien perusteisiin, huomasin niiden olevan hyvin monimutkaisia käyttää. Tietoja tarvitaan eri tietolähteistä ja tietojen täytyy olla tietyssä muodossa, laajuudessa tai resoluutiossa, jotta ohjelmat pystyvät niitä käyttämään. Maastopalojen sammutuksessa ja sammutuksen suunnittelussa ohjelmat eivät saa olla monimutkaisia tai liian vaikeita käyttää. Nopeus ja helppous ovat avainsanoja operatiiviseen käyttöön tarvittavista ohjelmista. Useat ohjelmat ovat vielä Windows®-pohjaisia. Moni laitevalmistaja käyttää kuitenkin Android-käyttöjärjestelmää, joten näitä ohjelmia ei voi käyttää Android-tabletilla tai Android-puhelimella.

Suomessa pelastusviranomaisilla ei ole käytössään yhteistä maastopalojen leviämistä mallintavaa ohjelmaa. Kokeiluja ja demoversioita on tehty, mutta ohjelmien monimutkaisuus ja laitteistolta vaadittavan suoritusnopeuden takia sopivaa ohjelmaa ei vielä ole otettu käyttöön. Mahdollisuuksia käyttää maastopalon leviämistä kuvaavia malleja tai ohjelmia Virtuaalimetsän yhteydessä voisi olla yksi jatkotutkimuksen aihe.

Opinnäytetyön tuloksena on tiivistetty tietokokonaisuus maastopalojen syntymiseen ja leviämiseen johtavista tekijöistä. Työ on laadittu Lapin ammattikorkeakoulun tuleviin tarpeisiin tutkimus-, kehitys- ja innovaatiotoimintaa, opetusta sekä hankehakuja ajatellen. Olen pyrkinyt toimimaan opinnäytetyön toimeksiantajan ohjeiden mukaisesti, olemassa olevien resurssien puitteissa.

Työn tekijänä koen onnistuneeni vastaamaan työlle asetettuihin tutkimuskysymyksiin. Aihe on ollut mielenkiintoinen ja laaja. Tutkimustyötä maastopaloihin liittyen on tehty paljon, ja tiedon rajaaminen koskemaan omaa työtäni oli paikoin hankalaa ja aikaa vievää. Kansainvälisten tutkimusten, artikkeleiden, kirjojen ja lehtien materiaalin lukeminen vei ajallisesti kauan. Alkuperäisen tiedon lähteen löytäminen oli välillä haastavaa. Kirjastopalveluiden osittainen puuttuminen vaikeutti tiedon hankintaa omalta osaltaan. Työn loppuun

asti saattaminen on vaatinut määrätietoisuutta ja päättäväisyyttä, periksiantamattomuutta unohtamatta.

Työ on sisältänyt paljon lukemista, tutkimusten tutkimista, kielen kääntämistä ja erilaisten monimutkaisten prosessien ymmärtämisen opettelua. Koen oppineeni opinnäytetyön aikana tiedonhakutaitoja, lähteiden luotettavuuden arviointia ja tieteellisten tekstien käsittelyä. Olen oppinut opinnäytetyön aiheesta sekä aihepiiristä hyvin paljon ja uskon voivani hyödyntää oppimaani tulevaisuudessa.

## LÄHTEET

Aarto, M. 2020. Maastopalojen leviämisen mallintaminen pelastustoimissa. Sähköposti antti.hillberg@edu.lapinamk.fi 14.7.2020. Tulostettu 14.7.2020.

Albini, F. A. 1979. Spot fire distance from burning trees – a predictive model. United States Department of Agriculture: Forest Service: Intermountain Forest and Range Experiment Station. Viitattu 13.5.2020  
[https://www.frames.gov/documents/behaveplus/publications/Albini\\_1979\\_INT-GTR-056\\_ocr.pdf](https://www.frames.gov/documents/behaveplus/publications/Albini_1979_INT-GTR-056_ocr.pdf).

Andrews, P.L. 2014. Current Status and future needs of the BehavePlus Fire Modeling System. *International Journal of Wildland Fire* 2014, 23, 21–33. Viitattu 20.7.2020 <https://dx.doi.org/10.1071/WF12167>.

Baines, P.G. 1990. Physical Mechanisms for the Propagation of Surface Fires. *Mathl Comput. Modelling* Vol. 13, No 12. Viitattu 17.7.2020



Baumeister, R.F. & Leary, M.R. 1992. Writing Narrative Literature Reviews. *Review of General Psychology* 1: 3, 311–320. Viitattu 5.8.2020  
<https://psychology.yale.edu/sites/default/files/baumeister-leary.pdf>.

Blom, J. 2020. Muhoksen metsäpaloa vastaava roihu nähtiin viimeksi 23 vuotta sitten – nyt palon leviämiseen vaikuttivat todennäköisesti sää ja sijainti. Viitattu 14.8.2020 <https://yle.fi/uutiset/3-11425696>.

Brown, J.K. & Smith, J.K. 2000. Appendix C: Glossary. Teoksessa J.K. Brown & J.K. Smith (toim.) *Wildland Fire in Ecosystems, Effects of Fire on Flora*. United States Department of Agriculture: Forest Service: Rocky Mountain Research Station, 248–249. Viitattu 13.5.2020  
[https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs\\_gtr042\\_2.pdf](https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_gtr042_2.pdf).

Burn-P3 2017. Version 4.7 User's Manual 2017. Viitattu 21.7.2020  
[http://www.firegrowthmodel.ca/burnp3/downloads/UMen\\_BurnP3\\_V4\\_7.pdf](http://www.firegrowthmodel.ca/burnp3/downloads/UMen_BurnP3_V4_7.pdf).

Byram, G.M. 1959. Combustion of forest fuels. Teoksessa K.P. Davis (toim.) *Forest Fire: Control and*. New York: McGraw Hill, 61–89. Viitattu 14.6.2020  
[https://www.frames.gov/documents/behaveplus/publications/Byram\\_1959\\_CombustionOfForestFuels.pdf](https://www.frames.gov/documents/behaveplus/publications/Byram_1959_CombustionOfForestFuels.pdf).

Centre for Climate Adaptation 2020a. Forest Fires Sweden. Vulnerabilities. Viitattu 10.6.2020 <https://www.climatechangepost.com/sweden/forest-fires/>.

– 2020b. Forest fires Finland. Vulnerabilities. Viitattu 6.7.2020  
<https://www.climatechangepost.com/finland/forest-fires/>.

– 2020c. Forest fires Sweden. Vulnerabilities. Viitattu 6.7. 2020  
<https://www.climatechangepost.com/sweden/forest-fires/>

– 2020d. Forest fires Russia. Forest fires in the future. Viitattu 7.7.2020  
<https://www.climatechangepost.com/russia/forest-fires/>.

COM Programmer Documentation 2014. PrometheusCOM Documentation. Why do we need this COM. Viitattu 21.7.2020  
<http://resources.firegrowthmodel.ca/com/PrometheusCOM/index.html>.

Conard, S.G. & Ivanova, G.A. 1997. Wildfire in Russian boreal forests – Potential impacts of fire regime characteristics on emissions and global carbon balance estimates. *Environmental Pollution* 98, 305–313. Viitattu 3.6.2020  
[https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(97\)00140-1](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(97)00140-1).

Davis, M.B., Shawn, R.G. & Etterson, J.R. 2005. Evolutionary responses to changing climate. *Ecology*: 86. The Ecological Society of America, 1704–1714. Viitattu 2.7.2020 <https://doi.org/10.1890/03-0788>.

Frames 2020. BehavePlus Fire Modeling System. Viitattu 22.7.2020  
<https://www.frames.gov/behaveplus/home>.

GitHub Inc. 2020. cell2fire/Cell2Fire. Viitattu 22.7.2020  
<https://github.com/cell2fire/Cell2Fire>.

Goldammer, J.G & Stocks, B.J. 2000. Eurasian Perspective of Fire. Teoksessa Kasische, E.S & Stocks, B.J. (toim.) Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest. New York: Springer-Verlag, 49–65. Viitattu 1.6.2020  
[https://books.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=9hXnBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR14&dq=fire+climate+change+and+carbon+cycling+in+the+boreal+forest+pdf&ots=3PBUOCXVIg&sig=UwOKpTTr504ltDen7A7Ay21IYe4&redir\\_esc=y#v=onepage&q=fire%20climate%20change%20and%20carbon%20cycling%20in%20the%20boreal%20forest%20pdf&f=false](https://books.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=9hXnBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR14&dq=fire+climate+change+and+carbon+cycling+in+the+boreal+forest+pdf&ots=3PBUOCXVIg&sig=UwOKpTTr504ltDen7A7Ay21IYe4&redir_esc=y#v=onepage&q=fire%20climate%20change%20and%20carbon%20cycling%20in%20the%20boreal%20forest%20pdf&f=false)

Government of Canada 2019. Fire behaviour, Types of wildland fires. Viitattu 13.5.2020  
<https://www.nrcan.gc.ca/our-natural-resources/forests-forestry/wildland-fires-insects-disturban/forest-fires/fire-behaviour/13145>.

Granström, A. 1996. Fire Ecology in Sweden and Future Use of Fire for Maintaining Biodiversity. Teoksessa J.G. Goldammer & V.V. Furyaev (toim.) Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 445–452.

Gromtsev, A. 2002. Natural Disturbance Dynamics in the Boreal Forests of European Russia: a Review. Teoksessa E. Korpilahti & T. Kuuluvainen (toim.) Silva Fennica, a quarterly journal of forest science. Disturbance Dynamics in Boreal Forests: Defining the Ecological Basis of Restoration and Management of Biodiversity. Tampere: Metsäntutkimuslaitos, 41–55.

Hannelius, S. 2020. Metsäpalot ovat riski valtion metsille. Helsingin Sanomat 17.1.2020. Viitattu 4.5.2020  
<https://www.hs.fi/mielipide/art-2000006374642.html>.

Hannelius, S. & Kuusela, K. 1995. Finland the country of evergreen forest. Forssa: Forssan kirjapaino Oy.

Hansen, R. 2003. Skogsbrandsläckning. Räddningsverket. Viitattu 23.5.2020  
<https://www.msb.se/RibData/Filer/pdf/18960.pdf>.

Heikkilä, T., Jurvelius, M., Niemi, I., Nissinen, S., Soudunsaari, M. & Valtoaho, T. 1999. Metsäpalot. Tampere: Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö.

Heikkilä, T.V., Grönqvist, R. & Jurvelius, M. 2010. Wildland Fire Management, Handbook for Trainers. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Forest Management Team, Forestry Department. Rome. Viitattu 13.6.2020  
<http://www.fao.org/3/a-i1363e.pdf>.

Heikkilä, T. V., Lindberg, H. & Vanha-Majamaa, I. 2011. Suomen metsien paloainekset – kohti parempaa tulen hallintaa. Vantaa: Vammalan kirjapaino. Viitattu 9.5.2020  
[http://www.metla.fi/julkaisut/muut/Suomen\\_metsien\\_paloainekset-suojattu.pdf](http://www.metla.fi/julkaisut/muut/Suomen_metsien_paloainekset-suojattu.pdf).

Heikkinen, M. 2020. Biologia ja ympäristötiede: Biomi. Viitattu 5.5.2020 <https://www.biomi.org/biologia/biomi/>.

Pohjois-Suomen aluehallintovirasto 2010. Helikopterilla toteutettavan sammutustoiminnan opas. Pohjois-Suomen aluehallintoviraston julkaisuja 2:2010: Oulu. Viitattu 2.6.2020 [https://www.pelastustoimi.fi/download/41808\\_hekosammutusopas2010.pdf?5f008c310f5bd488](https://www.pelastustoimi.fi/download/41808_hekosammutusopas2010.pdf?5f008c310f5bd488).

Holopainen, T., Vapaavuori, E. & Riikonen, J. 2005. Alkusanat. Teoksessa J. Riikonen & E. Vapaavuori (toim.) Ilmasto muuttuu – muuttuvatko metsät. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 944, 2005. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy, 4–5.

Hostikka, S., Mangs, J. & Paloposki, T. 2005. Metsäpalojen simulointi MASIFIRE-ohjelmalla. VTT rakennus- ja yhdyskuntateknikka. VTT:Espoo. Viitattu 20.7.2020 <https://docplayer.fi/377764-Metsapalojen-simulointi-masifire-ohjelmalla.html>.

Ilmatieteen laitos 2014. Ilmastonmuutos lisää metsäpalojen riskiä Suomessa. Viitattu 11.5.2020 [https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tiede uutisten-arkisto/-/asset\\_publisher/1R4q/content/ilmastonmuutos-lisaa-metsapalojen-riskia-suomes-1?redirect=http%3A%2F%2Fwww.ilmatieteenlaitos.fi%2Ftiede uutisten-arkisto%3Fp\\_p\\_id%3D101\\_INSTANCE\\_1R4q%26p\\_p\\_lifecycle%3D0%26p\\_p\\_state%3Dnormal%26p\\_p\\_mode%3Dview%26p\\_p\\_col\\_id%3Dcolumn-2%26p\\_p\\_col\\_count%3D1](https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tiede uutisten-arkisto/-/asset_publisher/1R4q/content/ilmastonmuutos-lisaa-metsapalojen-riskia-suomes-1?redirect=http%3A%2F%2Fwww.ilmatieteenlaitos.fi%2Ftiede uutisten-arkisto%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_1R4q%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-2%26p_p_col_count%3D1).

– 2020a. Ilman kosteus. Viitattu 30.6.2020 <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilman-kosteus>.

– 2020b. Tuulet ja myrskyt. Viitattu 1.7.2020 <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tuulet>.

– 2020c. Metsäpaloindeksi. Viitattu 17.7.2020 <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/metsapaloindeksi>.

Introduction to Wildland Fire Behavior S-190 2006. National Wildfire Coordination Group. Viitattu 23.5.2020 [https://pacificoasis.files.wordpress.com/2015/04/s-190\\_student-workbook.pdf](https://pacificoasis.files.wordpress.com/2015/04/s-190_student-workbook.pdf).

Jylhä, K., Ruosteenoja, K. & Tuomenvirta, H. 2005. Ilmastonmuutoskenaarioita Suomelle. Teoksessa J. Riikonen & E. Vapaavuori (toim.) Ilmasto muuttuu – muuttuvatko metsät. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 944, 2005. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy, 21–25.

Karpachevskiy, M. 2004. Forest Fires in the Russian Taiga: Natural Disaster or Poor Management? Taiga Rescue Network Factsheet. Viitattu 2.6.2020 <http://old.forest.ru/eng/publications/trn-forestfires/forestfire.pdf>.

- Karvinen, S., Väliky, E., Gerasimov, Y. & Dobrovolsky, A. 2011. Northwest Russian Forest Sector in a Nutshell. Sastamala: Metsäntutkimuslaitos. Viitattu 13.6.2020  
[file:///C:/Users/Omistaja/AppData/Local/Packages/Microsoft.MicrosoftEdge\\_8wekyb3d8bbwe/TempState/Downloads/Nutshell\\_web%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Omistaja/AppData/Local/Packages/Microsoft.MicrosoftEdge_8wekyb3d8bbwe/TempState/Downloads/Nutshell_web%20(1).pdf).
- Kauhanen, H. 2007. Forest Fires in the Russian Taiga. Teoksessa Hovi, M., Kytö, H. & Rautio, S-K. Fire and Forest. The International Forest Fire Symposium in Kajaani 13.-14.11.2007. Metsähallituksen luonnonsuojelujulkaisuja. Sarja A 175. Edita Prima Oy. Helsinki: Metsähallitus, 27–33. Viitattu 4.6.2020  
[https://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=book&fil=LIFE04NATFI000078\\_Fire\\_and\\_Forest.pdf](https://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=book&fil=LIFE04NATFI000078_Fire_and_Forest.pdf).
- Keto-Tokoi, P. & Kuuluvainen, T. 2011. Suomalainen aarniometsä. 2. painos. Hämeenlinna: Maahenki.
- Kolstela, J.O. 2020a. Metsäpalon leviämisen mallintaminen Suomessa. Itä-Suomen yliopisto. Historia- ja maantieteiden laitos. Pro Gradu -tutkielma. Viitattu 28.6.2020 [https://epublications.uef.fi/pub/urn\\_nbn\\_fi\\_uef-20200874/urn\\_nbn\\_fi\\_uef-20200874.pdf](https://epublications.uef.fi/pub/urn_nbn_fi_uef-20200874/urn_nbn_fi_uef-20200874.pdf).
- 2020b. Metsäpalojen leviämismallit. Metsäpalojen leviämisen ennustamisväline, Mellevä, Hankekoodi: A74528. Työpaketti 2. Ilmatieteen laitos. Viitattu 22.7.2020 <https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/melleva-raportti-metsapalojen-leviamismallit.pdf>.
- Kontturi, E. 2015. Hyvä tieteellinen käytäntö. Viitattu 27.7.2020  
[https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/145963/mod\\_resource/content/1/Hyvä%20tieteellinen%20käytäntö.pdf](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/145963/mod_resource/content/1/Hyvä%20tieteellinen%20käytäntö.pdf).
- Korovin, G.N. 1996. Analysis of the Distribution of Forest Fires in Russia. Teoksessa J.G. Goldammer & V.V. (toim.) Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 112–128.
- Larjavaara, M. 2005. Climate and forest fires in Finland – influence of lightning-caused ignitions and fuel moisture. Helsingin yliopisto. Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta. Väitöskirja. Viitattu 13.7.2020  
<https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/20633/climatea.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.
- Larjavaara, M., Kuuluvainen, T., Tanskanen, H. & Venäläinen, A. 2004. Variation in Forest Fire Ignition Probability in Finland. *Silva Fennica* vol. 38, 253–266. Viitattu 8.5.2020 <https://doi.org/10.14214/sf.414>.
- Lehtonen, I., Venäläinen, A., Kämäräinen, M., Peltola, H. & Gregow, H. 2015. Risk of large-scale fires in boreal forests of Finland under changing climate. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 239-253. Viitattu 6.7.2020  
[doi:10.5194/nhess-16-239-2016](https://doi.org/10.5194/nhess-16-239-2016).

Lemberg, T. 2001. Kulotuksen tekniikka ja menetelmät. Metsätehon raportti 105. Helsinki: Metsäteho Oy. Viitattu 20.8.2020 [http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/2015/02/metsatehon\\_raportti\\_105.pdf](http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/2015/02/metsatehon_raportti_105.pdf).

Lemberg, T. & Puttonen P. 2002. Kulottajan käsikirja. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Metsälehti.

Leskinen, L., Ala-Honkola, H., Kauranne, T., Viertola, M. & Ruusunen, J. 2020. Metsäpalon leviämismallin hyödyntämismahdollisuuksien selvittäminen. Mellevä -hankkeen työpaketti 2. Metsäkeskus. Viitattu 27.7.2020 <https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/melleva-raportti-tyopaketti2.pdf>.

Lindberg, H. 2013. Metsäpalot Suomessa sekä niiden riski ja torjunta- katsaus yleistilanteeseen, lähihistoriaan sekä kehitystarpeisiin. Viitattu 6.5.2020 <http://www.metla.fi/tapahtumat/2013/metsapalot/pdf/lindberg2.pdf>.

Lidskog, R., Johansson, J. & Sjödin, D. 2019. Wildfires, responsibility and trust: public understanding of Sweden's largest wildfire. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 34:4, 319–328. Viitattu 4.6.2020 <https://doi.org/10.1080/02827581.2019.1598483>.

Maa- ja metsätalousministeriö 2018. Pohjoisen havumetsävyöhykkeen maat koolla Haaparannassa. Viitattu 4.5.2020 [https://mmm.fi/artikkeli-/asset\\_publisher/pohjoisen-havumetsavyohykkeen-maat-koolla-haaparannassa#0ebfe24f](https://mmm.fi/artikkeli-/asset_publisher/pohjoisen-havumetsavyohykkeen-maat-koolla-haaparannassa#0ebfe24f).

Meriläinen-Tenhu, M. 2017. Metsä- ja maastopalot hillitsevät ilmaston lämpenemistä. Helsingin yliopisto. Viitattu 7.7.2020 <https://www.helsinki.fi/fi/uutiset/luonnontieteet/metsa-ja-maastopalot-hillitsevat-ilmaston-lampenemista>

Metsäkeskus 2016. Metsäpalot. Viitattu 12.5.2020 <https://www.metsakeskus.fi/metsapalot>.

Metsäkeskus 2020. Päättynyt: Metsäpalon leviämisen ennustamisväline – Mellevä. Viitattu 14.7.2020 <https://www.metsakeskus.fi/melleva>.

Metsäntutkimuslaitos 2012. Suomen metsät 2012: Peruskäsitteet ja tietolähteet, Metsän määritelmä. Viitattu 5.5.2020 <http://www.metla.fi/metinfo/kestavyys/basic.htm>.

Miettinen, H. 2007. Forest Fires and Fire Management. Teoksessa M. Pearson, O. Ojanen, M. Havimo, T. Kuuluvainen & H. Vasander (toim.) *On the European Edge, Journey through Komi Nature and Culture*. Helsinki: Department of Forest Ecology, University of Helsinki, 151–158.

Mönkkönen, M. 2004. Suomen metsäluonto – osa globaalia monimuotoisuutta. Teoksessa T. Kuuluvainen, L. Saaristo, P. Keto-Tokoi, J. Kostamo, J. Kuuluvainen, M. Kuusinen, M. Ollikainen & P. Salpakivi-Salomaa (toim.) *Metsän kätköissä – Suomen metsäluonnon monimuotoisuus*. Helsinki: Edita Publishing Oy, 19–47.

- Myndigheten för samhällskydd och beredskap. 2017. Drought and wildfires in Sweden, past variation and future projection. Viitattu 10.6.2020 <https://www.msb.se/siteassets/dokument/publikationer/english-publications/droughts-and-wildfires-in-sweden-past-variation-and-future-projection.pdf>.
- Myndigheten för samhällskydd och beredskap. 2018. Skogsbränderna 2018. Viitattu 4.6.2020 <https://www.krisinformation.se/detta-kan-handa/handelser-och-storningar/2018/brandrisk2018>.
- Mäkelä, H. 2015. Estimates of past and future forest fire danger in Finland from a climatological viewpoint. Helsingin yliopisto. Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta. Väitöskirja. Viitattu 20.6.2020 <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/153233/estimate.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Nelson Jr, R.M. 2001. Water Relations of Forest Fire. Teoksessa E. A. Johnson & K. Miyanishi (toim.) Forest Fires, behaviour and ecological effects. San Diego: Academic Press. A Harcourt Science and Technology Company, 79–143. Viitattu 19.6.2020 [https://books.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=MXa8npbbahQC&oi=fnd&pg=PP1&dq=forest+fires+behavior+and+ecological+effects+pdf&ots=VhSiyZ3mW-&sig=N\\_i5VgJ9kwqPhrnvieOZCl-9aPo&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=MXa8npbbahQC&oi=fnd&pg=PP1&dq=forest+fires+behavior+and+ecological+effects+pdf&ots=VhSiyZ3mW-&sig=N_i5VgJ9kwqPhrnvieOZCl-9aPo&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false).
- Niklasson, M. & Granström, A. 2004. Fire in Sweden – History, Research, Prescribed Burning and Forest Certification. 2004. International Forest Fire News No. 30, 80-83. Viitattu 12.5.2020 <http://gfmconline.org/programmes/natcon/swedfires.pdf>.
- Nilsson, S. & Shvidenko, A. 1997. The Russian Forest Sector. A Position Paper for The World Commission on Forests and Sustainable Development. Viitattu 2.6.2020 <https://textarchive.ru/c-2793654-pall.html>.
- Oikeusministeriö. 2018. Lakialoite avohakkuiden lopettamiseksi valtion mailla. Viitattu 10.5.2020 <https://www.kansalaisaloite.fi/fi/aloite/3184>.
- Pais, C., Carrasco, J., Martell, D.L., Weintraub, A. & Woodruff, D.L. 2019. Cell2Fire: A Cell Based Forest Fire Growth Model, 1–47. Viitattu 22.7.2020 arXiv:1905.09317v1 [stat.CO].
- Parisien, M.A., Kafka, V.G., Hirsch, K.G., Todd, J.B., Lavoie, S.G. & Maczek, P.D. 2005. Mapping Wildfire Susceptibility with The Burn-P3 Simulation Model. Information Report NOR-X-405. Canadian Forest Service. Northern Forestry Centre. Viitattu 23.7.2020 <https://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/25627.pdf>.

Pastor, E., Zárate, L., Planas, E. & Arnaldos, J. 2003. Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. *Progress in Energy, and Combustion Science* 29, Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, Diagonal 647, 139–153. Viitattu 23.7.2020  
[file:///C:/Users/Omistaja/AppData/Local/Packages/Microsoft.MicrosoftEdge\\_8wekyb3d8bbwe/TempState/Downloads/Mathematical\\_models\\_and\\_calculation\\_sy st%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Omistaja/AppData/Local/Packages/Microsoft.MicrosoftEdge_8wekyb3d8bbwe/TempState/Downloads/Mathematical_models_and_calculation_sy st%20(1).pdf).

Parviainen, J. 1993. Tuli metsän ekologisessa kierrossa. Teoksessa E. Piri (toim.) *Tuli metsän ekologisessa kierrossa. Metsäntutkimuslaitoksen 75-vuotisjuhlaretkeily Kolilla 7.–8.6. 1993. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 462. Metsäntutkimuslaitos, 8–14. Viitattu 9.6.2020  
[file:///C:/Users/Omistaja/AppData/Local/Packages/Microsoft.MicrosoftEdge\\_8wekyb3d8bbwe/TempState/Downloads/951-40-1303-4%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Omistaja/AppData/Local/Packages/Microsoft.MicrosoftEdge_8wekyb3d8bbwe/TempState/Downloads/951-40-1303-4%20(1).pdf).

Parviainen, J. 1996. The Impact of Fire on Finnish Forests in the Past and Today. Teoksessa J.G. Goldammer & V.V. Furyaev (toim.) *Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 55–63.

Pelastuslaki 29.4.2011 2011/379.

Pelastusopisto 2013. Pelastustoimen taskutilasto 2008–2012. Pelastusopiston julkaisu. D-sarja: Muut 3/2013. Viitattu 11.5.2020  
[https://www.pelastusopisto.fi/wp-content/uploads/2016/12/46395\\_D3\\_2013.pdf](https://www.pelastusopisto.fi/wp-content/uploads/2016/12/46395_D3_2013.pdf)

Pelastusopisto 2019. Pelastustoimen taskutilasto 2014–2018. Pelastusopiston julkaisu. D-sarja: Muut 1/2017. Viitattu 11.5.2020  
[http://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja\\_D/D1\\_2017.pdf](http://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja_D/D1_2017.pdf).

Peltonen, M., Airaksinen P., Aldén, S., Hallman, E., Heikura, A., Jaakkola, S., Kuusinen, M., Lipponen, K., Litmanen, P., Nevalainen, A., Peltonen, A., Roininen, H., Tomperi, P. & Pouttu, A. 2003. Metsätuhotyöryhmä. Työryhmämuistio MMM 2003:11. Helsinki: Maa- ja metsätalousministeriö. Viitattu 25.6.2020  
<https://docplayer.fi/3720138-Tyoryhmamuistio-mmm-2003-11-metsatuhotyoryhma.html>.

Prometheus 2019. Ahead of Wildland Fire. Viitattu 21.7.2020  
[http://www.firegrowthmodel.ca/prometheus/overview\\_e.php](http://www.firegrowthmodel.ca/prometheus/overview_e.php).

PRONTO 2015. Dynaaminen koulutus kansio 8.10.2015. Onnettomuustyyppin valinta. Viitattu 11.5.2020  
[https://www.pelastusopisto.fi/wp-content/uploads/2017/02/63021\\_c\\_onnettomuustyyppin\\_valinta.pdf](https://www.pelastusopisto.fi/wp-content/uploads/2017/02/63021_c_onnettomuustyyppin_valinta.pdf).

Quartieri, J., Mastorakis, N.E., Iannone, G. & Guarnaccia, C. 2010. A Cellular Automata Model for Fire Spreading Prediction. Conference: 3rd WSEAS International Conference on Urban Planning and Transportation (UPT 10). Corfu Island. Greece. Viitattu 15.7.2020  
[https://www.researchgate.net/publication/256662471\\_A\\_Cellular\\_Automata\\_Model\\_for\\_Fire\\_Spreading\\_Prediction](https://www.researchgate.net/publication/256662471_A_Cellular_Automata_Model_for_Fire_Spreading_Prediction).

Rothermel, R.C. 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Res. Pap. INT-115, 1–40. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. Utah: Ogden. Viitattu 19.7.2020 [https://www.fs.fed.us/rm/pubs\\_int/int\\_rp115.pdf](https://www.fs.fed.us/rm/pubs_int/int_rp115.pdf).

Ruuska, R. Maastopalojen leviämisen mallintaminen pelastuslaitoksilla. Sähköposti antti.hillberg@edu.lapinamk.fi 23.7.2020. Tulostettu 23.7.2020.

Saaranen-Kauppinen, A. & Puusniekka, A. 2006. Menetelmäopetuksen tietovaranto KvaliMOTV. Yhteiskuntatieteellinen tietoarkisto. Tampere: Tampereen yliopisto. Viitattu 28.7.2020 <https://www.fsd.tuni.fi/menetelmaopetus/>.

Saari, E. 1923. Kuloista – etupäässä Suomen valtion metsiä silmällä pitäen. Tilastollinen tutkimus. Helsinki: Suomalaisen kirjallisuuden seuran kirjapainon O.Y. Viitattu 4.6.2020  
file:///C:/Users/Omistaja/AppData/Local/Packages/Microsoft.MicrosoftEdge\_8wekyb3d8bbwe/TempState/Downloads/26-1923\_Saari%20(1).pdf.

Salminen, A. 2011. Mikä kirjallisuuskatsaus? Viitattu 24.8.2020 [https://www.univaasa.fi/materiaali/pdf/isbn\\_978-952-476-349-3.pdf](https://www.univaasa.fi/materiaali/pdf/isbn_978-952-476-349-3.pdf).

Saukkonen, L. 2020. Sään ääri-ilmiöt ja ilmastonmuutos. Helsinki: Minerva Kustannus Oy.

Shvidenko, A.S. & Nilsson, S. 2000. Extent, Distribution and Ecological Role of Fire in Russian Forest. Teoksessa E.S. Kasische & B.J. Stocks (toim.) Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest. New York: Springer-Verlag, 132–150. Viitattu 27.5.2020  
[https://books.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=9hXnBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR14&dq=fire+climate+change+and+carbon+cycling+in+the+boreal+forest+pdf&ots=3PBUOCXVIg&sig=UwOKpTTr504ltDen7A7Ay21IYe4&redir\\_esc=y#v=onepage&q=fire%20climate%20change%20and%20carbon%20cycling%20in%20the%20boreal%20forest%20pdf&f=false](https://books.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=9hXnBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR14&dq=fire+climate+change+and+carbon+cycling+in+the+boreal+forest+pdf&ots=3PBUOCXVIg&sig=UwOKpTTr504ltDen7A7Ay21IYe4&redir_esc=y#v=onepage&q=fire%20climate%20change%20and%20carbon%20cycling%20in%20the%20boreal%20forest%20pdf&f=false).

Sveaskog 2018. Samlad information om skogsbränderna 2018. Viitattu 3.6.2020 <https://www.sveaskog.se/skogsbrander/>.

Tanskanen, H. 2007. Fuel conditions and fire behavior characteristics of managed *Picea abies* and *Pinus sylvestris* forests in Finland. Helsingin yliopisto. Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta. Väitöskirja. Viitattu 25.7.2020 <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/20634/fuelcond.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Termipankki 2020. Kulotus. Viitattu 5.5.2020 <https://termipankki.fi/tepa/fi/haku/kulotus>.

The Bushfire Foundation Inc. 2020a. Fire behaviour. Viitattu 14.5.2020, <https://www.thebushfirefoundation.org/how-fire-behaves/>.

– 2020b. Fire behaviour. Terrain (topography). Viitattu 30.6.2020 <https://www.thebushfirefoundation.org/how-fire-behaves/>.



Tilastokeskus 2020. Käsitteet. Iterointi. Viitattu 21.7.2020  
<https://www.stat.fi/meta/kas/iterointi.html>.

Tymstra, C., Bryce, R.W., Wotton, B.M., Taylor, S.W. & Armitage, O.B. 2010. Development and Structure of Prometheus: The Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model. Information Report NOR-X-417. Canadian Forest Service. Northern Forestry Centre. Viitattu 26.7.2020  
[http://www.firegrowthmodel.ca/prometheus/downloads/Prometheus\\_Information\\_Report\\_NOR-X-417\\_2010.pdf](http://www.firegrowthmodel.ca/prometheus/downloads/Prometheus_Information_Report_NOR-X-417_2010.pdf).  
United State Department of Agriculture 2018. BehavePlus. Viitattu 23.7.2020  
<https://www.firelab.org/project/behaveplus>

Van Wagner, C.E. 1974. Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index. Canadian Forestry Service Publication No. 1333. Department of the Environment. Ottawa. Viitattu 29.7.2020  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.460.3231&rep=rep1&type=pdf>.

Venäläinen, A., Lehtonen, I. & Mäkelä, A. 2016. Laaja-alaisia metsäpaloja mahdollistavat säätilanteet Suomen ilmastossa. Ilmatieteen laitoksen raportteja 2016:3. Helsinki: Erweko. Viitattu 27.6.2020  
<https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/161478/suurpalot.pdf?sequence=1>.