



**PELASTUSOPISTO**



**POLIISI**

POLISIAMMATTIKORKEAKOULU

# Maastopaloissa käytettävät kemialliset aineet

**Paloa ennaltaehkäisevät aineet ja polttotestit**

Mira Pieviläinen

5/2025

Opinnäytetyö / pelastusalan päällystötutkinto (AMK)

# Tiivistelmä

<b>TEKIJÄ:</b>	Mira Pieviläinen
<b>OPINNÄYTETYÖN NIMI:</b>	Maastopaloissa käytettävät kemialliset aineet. Paloa ennaltaehkäisevät aineet ja polttotestit
<b>OPINNÄYTETYÖN MUOTO:</b>	tutkimuksellinen
<b>JULKISUUSASTE:</b>	julkinen
<b>OHJAAJA:</b>	Raimo Savola
<b>TUTKINTO:</b>	pelastusalan päällystötutkinto (AMK)
<b>SIVUMÄÄRÄ:</b>	49
<b>TARKASTUSKUUKAUSI JA -VUOSI:</b>	5/2025
<b>AVAINSANAT:</b>	maastopalo, kemialliset rajoitusaineet, polttotestit

Suomessa suuret maastopalot eivät toistaiseksi ole muodostaneet merkittävää vuosittaista uhkaa. Ennusteiden ja asiantuntija-arvioiden mukaan ilmastonmuutoksen myötä suurille maastopaloille otolliset sääolosuhteet lisääntyvät tulevaisuudessa myös Suomessa. Suurten ja laajojen maastopalojen aiheuttamat vahingot ovat merkittäviä, ja pelastustoimen kuluista suurin osa on henkilöstökuluja. Maastopalojen torjunnassa ennaltaehkäisyllä on iso merkitys. Yksi mahdollinen keino palon leviämisen rajoittamiseen on kemiallisten rajoitusaineiden käyttö, joka Suomessa on toistaiseksi ollut hyvin vähäistä.

Tässä opinnäytetyössä tarkasteltiin maastopaloihin liittyviä ilmiöitä sekä niissä käytettäviä kemiallisia aineita. Pääpaino oli laboratorio-olosuhteissa suoritetuissa polttokokeissa, joissa testattiin kahden eri paloa ennaltaehkäisevän aineen toimivuutta ja tehokkuutta maastopalojen rajoittamisessa. Polttokokeissa ei havaittu yksiselitteisiä selkeitä eroja veden ja rajoitusaineiden välillä, mikä johtui pääasiassa koeasetelman haasteista. Kolmannessa polttokokeessa aineet kuitenkin osoittivat selkeää tehokkuutta, jossa paloa ennaltaehkäisevällä aineella käsitelty kunta säilyi vahingoittumattomana altistuttuaan voimakkaalle lämpörasitukselle. Myös aiemmat rajoitusaineiden käyttötestit tukevat niiden tehokkuutta.

Jotta kemiallisia rajoitusaineita voitaisiin tulevaisuudessa hyödyntää tehokkaasti, tarvitaan lisäselvityksiä operatiivisista ja taloudellisista edellytyksistä, levityskaluston soveltuvuudesta sekä logistisista ratkaisuista. Myös pelastuslaitosten tietoisuutta ja mahdollisia käyttökokemuksia ennaltaehkäisevien aineiden käytöstä olisi hyödyllistä selvittää.

# Abstract

<b>AUTHOR:</b>	Mira Pieviläinen
<b>TITLE OF THESIS:</b>	Chemical agents used in wildfires. Fire retardants and burn test
<b>TYPE OF THESIS:</b>	research-based thesis
<b>PUBLICITY:</b>	public
<b>SUPERVISOR:</b>	Raimo Savola
<b>DEGREE:</b>	Bachelor of Rescue Services
<b>NUMBER OF PAGES:</b>	49
<b>MONTH AND YEAR OF REVIEW:</b>	5/2025
<b>KEYWORDS:</b>	wildfire, chemical fire retardants, burn tests

In Finland large wildfires have not yet posed a significant annual threat. Experts and forecasts suggest that climate change will make weather conditions more conducive for major wildfires in Finland in the future. The damage caused by extensive wildfires can be substantial. Most of rescue service expenses consist of personnel costs. Preventive measures play a key role in wildfires management. One potential method for limiting the spread of fire is the use of chemical fire retardants which has so far been very limited in Finland.

This thesis examined phenomena related to wildfires and the chemical agents used in their management. The main focus was on burn tests performed in a laboratory environment. The tests assessed how effective two fire preventive agents were at slowing or stopping the spread of wildfires. The burn tests did not reveal any clear or unambiguous differences between fire retardants and water. This was mainly a result of the experimental setup. However, in the third burn test, the agents demonstrated clear effectiveness. The forest floor treated with the fire preventive agent remained undamaged despite being exposed to intense heat. Previous tests involving the use of fire retardants also support their effectiveness.

To use chemical fire retardants effectively in the future, more research is needed on their operational and economic feasibility, the right application equipment and logistical solutions. It would also be beneficial to assess how aware rescue services are of fire preventive agents and if they have any experience using them.

# Sisällys

1 Johdanto .....	5
2 Maastopalot .....	6
2.1 Maastopalon dynamiikka .....	7
2.2 Maastopalojen esiintymismuodot ja metsäkerrokset .....	10
2.3 Palokatkot maastopalon hallinnassa .....	12
2.4 Maastopalon ennustettavuus .....	13
3 Maastopaloissa käytettävät kemialliset aineet .....	16
3.1 Palonestoaineiden historia ja koostumus .....	16
3.2 Suora hyökkäys .....	17
3.3 Epäsuora hyökkäys .....	17
3.4 A-luokan vaahdot ja geelit.....	17
3.5 Pitkävaikutteiset palonestoaineet.....	18
3.6 Ympäristövaikutukset.....	18
4 Ennaltaehkäisevien aineiden testit .....	20
4.1 Tutkimuskysymykset ja polttokokeiden valmistelut.....	20
4.2 Tulokset.....	23
4.2.1 Ennaltaehkäisevien aineiden ominaisuudet.....	23
4.2.2 Ensimmäinen polttokoepäivä.....	25
4.2.3 Toinen polttokoepäivä .....	34
4.3 Päätelmät .....	41
5 Ennaltaehkäisevien aineiden käyttö Suomessa.....	43
6 Pohdinta.....	45
Lähteet.....	47

# 1 Johdanto

Suomessa suuret maastopalot eivät toistaiseksi ole muodostaneet merkittävää vuosittaista uhkaa. Useat ennusteet ja asiantuntija-arviot kuitenkin osoittavat, että ilmastonmuutoksen myötä suurille maastoaloille otolliset sääolosuhteet lisääntyvät myös Suomessa. Suurten maastopalojen aiheuttamat vahingot ovat merkittäviä, ja laajoja maastopaloja on koettu viime vuosina myös Suomessa. Maastopalojen torjunnassa ennaltaehkäisyllä on keskeinen rooli. Yksi mahdollinen keino palon leviämisen rajoittamiseen on kemiallisten rajoitusaineiden käyttö, mikä Suomessa on toistaiseksi ollut hyvin vähäistä.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on perehtyä maastopaloihin ja niissä käytettäviin kemiallisiin aineisiin painottuen paloa ennaltaehkäiseviin aineisiin. Opinnäytetyön pääpaino on käytännön polttoteisteissä, joissa testataan kahden paloa ennaltaehkäisevän aineen toimivuutta ja tehokkuutta laboratorio-olosuhteissa.

Työssä käsitellään aluksi maastopalojen dynamiikkaa sekä maastopalojen hallittavuutta ja etenemisen ennustettavuutta. Kolmannessa luvussa perehdytään maastopaloissa käytettäviin kemiallisiin aineisiin. Tämän luvun teoretiset tiedot on suurimmaksi osaksi ulkomaalaisista lähteistä. Neljännessä kappaleessa käydään läpi tutkimuskysymykset, koeasetelmat ja polttokokeet sekä niiden tulokset. Lopuksi selvitetään, kuinka maastopaloja ennaltaehkäiseviä aineita on käytetty Suomessa, ja pohditaan, missä tilanteissa niiden käyttö voisi olla perusteltua.

Tämä opinnäytetyöaihe löytyi opinnäytetöiden aihepankista. Kiinnostuin aiheesta sen ajankohtaisuuden ja käytännönläheisyyden vuoksi. Käytännön koejärjestelyissä oli suurena apuna ohjauksen opettajan lisäksi Pelastusopiston tutkimus-, kehittämis- ja innovaatiopalveluiden Pekka Toivanen, Kalle Kiviranta ja Juha Laitinen. Testeissä käytettävät paloa ennaltaehkäisevät aineet saatiin kahdelta kotimaiselta tuottajalta. Tässä opinnäytetyössä ei mainita tuotteita tai yrityksiä nimeltä.

## 2 Maastopalot

Maastopalolla (wildland fire; wildfire) tarkoitetaan rakentamattoman alueen hallitsematonta paloa. Metsäpalolla (forest fire; woods fire) puolestaan tarkoitetaan maastopaloa, jossa palaa metsää. (Sanastokeskus.) Maastopalot luokitellaan pieneksi, keskisuureksi ja suureksi niiden laajuuden ja vakavuuden perusteella.

Maastopaloja voidaan pitää yhtenä vaarallisimmista "luonnonkatastrofeista" ihmisyyhteiskunnille. Suomi kuuluu boreaaliseen havumetsävyöhykkeeseen, ja sen kokonaispinta-alasta 75 % on metsien peitossa. Suomen ilmastollisten ja luonnonmaantieteellisten olosuhteiden yhdistelmä ei suosi suurten, katastrofaalisten maastopalojen leviämistä. Luonnollisina paloaukkoina toimivat järvet, laajat tieverkostot, sekä metsänhoitokulttuuri avohakkuineen ja puunkorjuusta syntyneen biomassan poistaminen metsistä auttavat pitämään maastopalot melko pieninä verrattuna Etelä-Eurooppaan. Ilmastoennusteet viittaavat merkittävään lämpenemiseen ja helleaaltojen määrän lisääntymiseen sekä kuivuuteen ja kuiviin jaksoihin suurimmassa osassa Etelä-Eurooppaa, mikä lisää sekä palokauden pituutta että vakavuutta. Odotettavaa on, että myös Suomessa kevät aikaistuu, kesän hellejaksot yleistyvät ja pitenevät, aurinkoisten päivien määrä lisääntyy sekä ukkospuuskat yleistyvät (Vehkaoja 2020, 10). Ilmatieteenlaitoksen tutkimuksen (Venäläinen, Lehtonen & Mäkelä 2016, 26) mukaan Etelä-Suomessa esiintyy lähes vuosittain sää, joka voisi aiheuttaa maastopalon leviämisen suurpaloksi. Keski-Suomessa tällaisia tilanteita on noin joka kolmas vuosi. Seuraavien vuosikymmenten aikana erittäin palovaarallisten säätilanteiden arvioidaan yleistyvän merkittävästi. Vakavien maastopalojen riskin kasvamiseen uskoo myös suuri osa Suomen pelastusalan ja metsäsektorin ammattilaisia (Kukkonen 2021, 51).

Viimeisen viiden vuoden aikana suuret maastopalot ovat lisääntyneet Pohjois-Euroopassa (Fernandez-Anez & Węgrzyński, 2024), ja viime vuosikymmenen aikana laajat maastopalot ovat yleistyneet ja voimistuneet jopa arktisilla alueilla, missä ne ovat perinteisesti olleet harvinaisia. Ilmaston lämpeneminen on nostanut alueen lämpötiloja keskimääräistä nopeammin, mikä luo otolliset olosuhteet laajoille ja pitkäkestoisille tulipaloille. Kuiva maa, poikkeuksellisen korkeat lämpötilat, ukkosmyrskyt ja voimakkaat tuulet ovat kiihdyttäneet palojen leviämistä. Runsaasti hiiltä sisältävä metsämaan kuivunut turve ylläpitää palamista pitkään. (Blunt, Bailey & Rodgers 2019.)

Pronto on pelastustoimen onnettomuus- ja resurssitilasto, joka koostuu alueellisten pelastuslaitosten ylläpitämistä toimenpide- ja resurssirekistereistä. Prontoon kirjataan maastopalot, joihin pelastuslaitos on hälytetty. Tilastojen perusteella (taulukko 1) maastopalot eivät ole toistaiseksi muodostaneet Suomessa merkittävää vuosittaista uhkaa. Kansainväliesti vertaillen Suomen tilanne näyttyy hyvin maltillisena. Esimerkiksi Yhdysvalloissa vuosien 2013–2022 aikana rekisteröitiin vuosittain keskimäärin 44 575 maastopaloa, jotka polttivat yhteensä lähes 2,5 miljoonaa hehtaaria maata (McCrea 2023). Poikkeuksellisia vuosia Suomessa ovat kuitenkin olleet 2002, 2003, 2006 ja 2018, jolloin maastopalojen määrä on ollut selvästi keskimääräistä korkeampi. Näinä vuosina myös palaneiden maa-alueiden pinta-alat ovat olleet tavanomaista laajempia, lukuun ottamatta vuotta 2002, jolloin kokonaispinta-ala jäi keskiarvon alapuolelle. Vuonna 2021 palaneen metsäalan keskimääräinen pinta-ala oli tilaston korkein. Tämä johtunee kyseisen vuoden Kalajoen maastopalosta, jolloin yksittäisessä maastopaloissa metsää paloi kokonaisuudessaan 227 hehtaaria (Saarela 2022, 5). Kokonaisuutena tarkasteltuna tilastoista on kuitenkin havaittavissa, että maastopalojen esiintyvyydessä tapahtuu ajoittaisia piikkejä. Lisäksi useat

asiantuntija-arviot ja ilmastonmuutokseen liittyvät ennusteet viittaavat siihen, että maastopalojen määrä ja laajuus voivat tulevaisuudessa lisääntyä. Tämä kehitys edellyttää varautumisen ja ennaltaehkäisevien toimenpiteiden jatkuvaa kehittämistä.

Taulukko 1. Maasto- ja metsäpalojen lukumäärät sekä vahingot vuosina 2000–2024 sisältäen maastopalon myös toissijaisena onnettomuustyyppinä (Pronto 2025).

<b>Maasto- ja metsäpalojen lukumäärät sekä vahingot vuosina 2000-2024</b>					
<b>Vuosi</b>	<b>Maastopalojen lukumäärä</b>	<b>Joista metsäpaloja</b>	<b>Palanut maastoala yhteensä (ha)</b>	<b>Josta palanut metsäala (ha)</b>	<b>Palanut metsäala keskimäärin (ha)</b>
2000	2 108	806	1183,94	261,85	0,32
2001	1 910	796	284,15	173,88	0,22
2002	5 126	2 489	806	583,76	0,23
2003	3 841	1 707	1298,05	663,97	0,39
2004	2 197	783	718,25	350,89	0,45
2005	2 631	1 041	1052,01	489,13	0,47
2006	6 290	2 993	2178,04	1595,41	0,53
2007	2 813	1 153	828,62	570,34	0,49
2008	3 161	1 415	1175,31	824,9	0,58
2009	2 746	1 201	921,37	531,45	0,44
2010	2 997	1 368	889,42	512,3	0,37
2011	2 770	1 215	873,57	580,08	0,48
2012	1 011	417	215,93	86,48	0,21
2013	2 764	1 452	691,92	461,43	0,32
2014	3 511	1 660	1301,95	880,91	0,53
2015	1 581	745	301,76	143,27	0,19
2016	2 008	933	532,63	310,51	0,33
2017	2 181	881	769,16	459,6	0,52
2018	4 252	2 427	1621,26	1228,29	0,51
2019	2 920	1 458	773,29	465,88	0,32
2020	2 641	1 260	938,48	719,18	0,57
2021	2 357	1 231	972,51	784,72	0,64
2022	2 265	1 129	369,31	266,93	0,24
2023	2 571	1 346	557,49	382,54	0,28
2024	2 209	1 261	512,24	391,27	0,31
<b>Yhteensä</b>	<b>70 861</b>	<b>33 167</b>	<b>21766,67</b>	<b>13718,95</b>	<b>0,41</b>

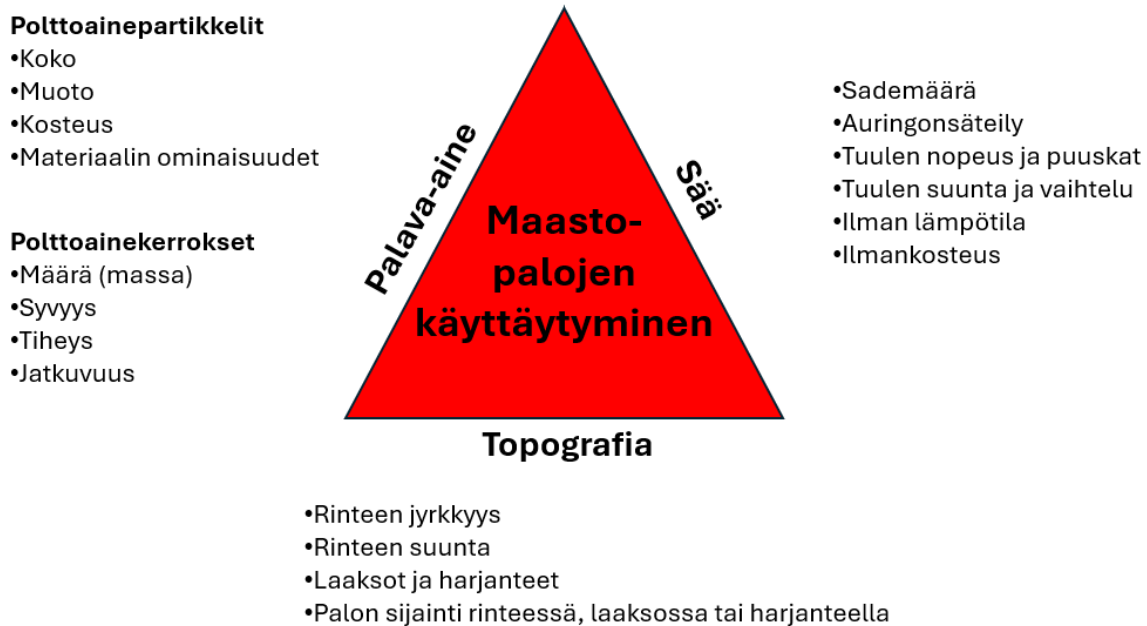
Maastopaloista aiheutuu myös kustannuksia ja taloudellisia menetyksiä pelastuslaitoksille, valtiolle, kunnille ja metsänomistajille sekä vakuutusyhtiöille. Esimerkiksi Kalajoen maastopalon kustannukset nousivat reilusti yli 2 miljoonan euron. Näistä sammutuskustannuksista suurin osa oli henkilöstökuluja. (Holopainen 2021.) Mänttari (2022, 11) arvioi, että pelastuslaitoksille maastopalojen sammuttamisesta syntyy kuluja, joiden arvioidaan olevan keskimäärin 3000 euroa hehtaaria kohden.

## 2.1 Maastopalon dynamiikka

Palo syttyy ja leviää lämmön siirtymisen välityksellä johtumalla, säteilemällä ja kuljettumisen avulla. Maastopalon leviämisessä lämmön johtumisella ei ole suurta merkitystä, koska metsien paloainesten lämmönjohtavuus on varsin alhainen. Maastopalot leviävät pääsääntöisesti siis lämpösäteilyn ja kulkeutumisen avulla. Lämpösäteilyn voimakkuus on suoraan riippuvainen palon voimakkuudesta eli intensiteetistä. Kun palon ympärillä olevapaloaines saavuttaa

syttymislämpötilan, sytty se palamaan ja tuli leviää. Kulkeutumisen avulla tuli voi levitä palokasujen tai paloainesten siirtymisen mukana. Kuumat palokaasut kulkeutuvat vallitsevien sääolosuhteiden ja pinnanmuotojen ohjaamina palamattomille alueille. Voimakkaissa paloissa kuumat ilmvirtaukset voivat kuljettaa paloaineksia jopa kilometrin päähän sytyttäen uusia heitepaloja eli piste- tai pesäkepaloja. Kaikki metsien orgaaniset aineet ovat palavia riittävän korkeassa lämpötilassa, mutta syttyvydessä on huomattavaa vaihtelua. Kuivien paloainesten keskimääräisenä syttymislämpötilana voidaan pitää 250–400 °C. (Hyttinen, Tolonen & Väisänen 2018, 71–75; Lindberg, Heikkilä, Vanha-Majamaa 2011, 19.)

Maastopalon käyttäytymiseen ja kulkuun vaikuttavat kolme päätekijää, jotka ovat palava-aines (polttoaine), sää sekä maastonmuodot (kuva 1). Jokaisella tekijällä on useita ominaisuuksia, jotka vaikuttavat maastopalon leviämiseen. Maastopalon käyttäytymiskolmio ei kerro, miten palon käyttäytyminen muuttuu polttoaineiden, sään ja maaston lukemattomien muunnelmien tai itse palon kasvun ja muodonmuutosten seurauksena. Se antaa kuitenkin viitekehyksen, jonka avulla voidaan arvioida ja ennustaa kuinka palo mahdollisesti käyttäytyy. (Finney ym. 2021, 21–22.)



Kuva 1. Maastopalojen käyttäytymiskolmio koostuu kolmesta ympäristötekijästä: palavasta-aineksestä, säästä ja topografiasta. Jokaisella tekijällä on useita ominaisuuksia, jotka vaikuttavat palon leviämiseen ja sen vapauttaman energian määrään. (Mukaillen Finney ym. 2021, 21.)

Palava aines voidaan jakaa kahteen tasoon: yksittäisiin partikkeleihin ja polttoainekerrokseen. Polttoainepartikkelit ovat yksittäisiä kappaleita kuten ruohoa, lehtiä, sammalta tai lahonnutta puuta. Näiden ominaisuudet, kuten kosteus, koko ja tiheys, vaikuttavat palamisen voimakkuuteen ja syttymisherkkyyteen. (Finney ym. 2021, 21–22.) Paloväline voidaan jakaa myös eläviin ja kuolleisiin aineisiin sekä hienoihin ja karkeisiin paloaineksiin. Elävä aine on harvoin syttyvää, mutta metsäpaloissa latvapalojen tärkein paloväline on elävää, kuten havupuiden neulas. Öljymäisten yhdisteiden vuoksi ne palavat helposti, vaikka niiden syttymispiste on korkeampi kuin kuivan palovälineen. Sammaleet ja jäkälät ovat elävää kasvillisuutta, mutta kuivuuksaan ne vastaavat usein kuollutta ainesta ja pitkän sateettoman jakson jälkeen syttyvät herkästi. Hienoa

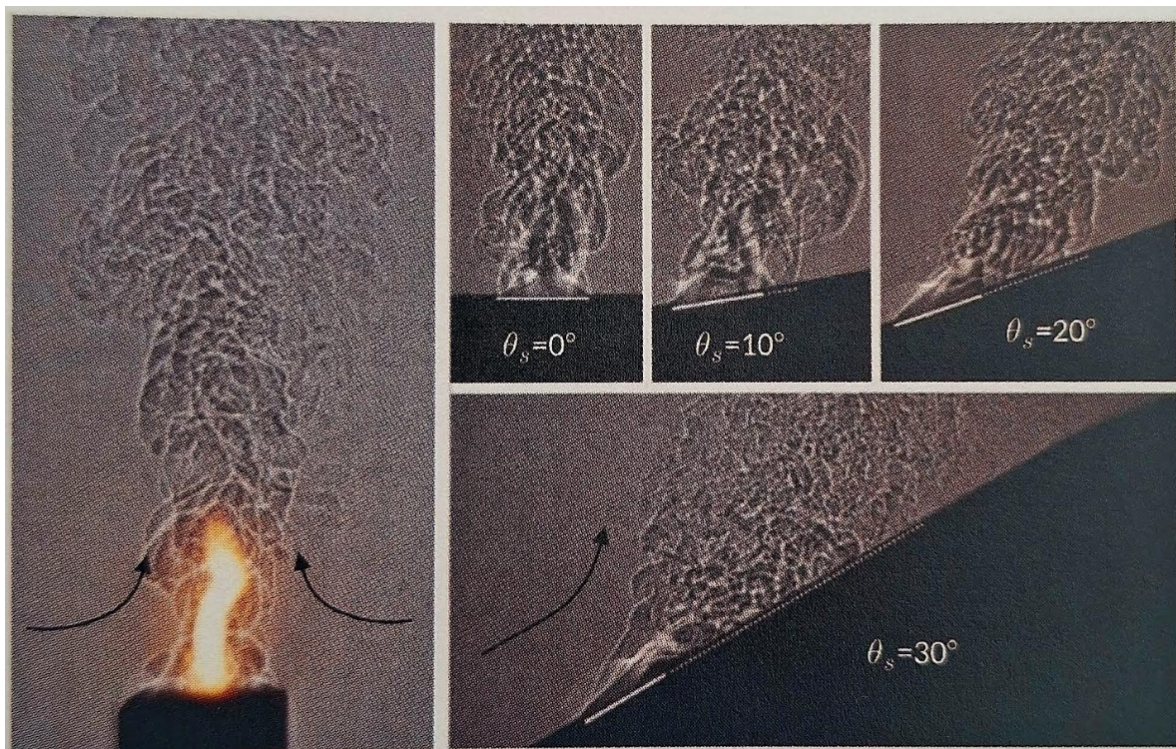
ainesta ovat alle 6 mm läpimitaltaan olevat ainekset ja karkeaa ainesta yli 6 mm läpimitaltaan olevat ainekset. Hienot ainekset, kuten neulaset ja oksan pätkät kuivuvat nopeasti ja syttyvät herkästi. Hienoilla aineksilla onkin palon syttymisen ja leviämisen kannalta olennainen rooli. (Nieminen 2020, 9–10.)

Paloainesten määrällä (palokuormalla) on keskeinen vaikutus arvioitaessa esimerkiksi palon voimakkuutta tai riskiä. Se ilmaisee palossa vapautuvan potentiaalisen energian määrän ja vaikuttaa myös aineksen kosteuskäyttäytymiseen. Palokuorma esitetään yleensä massa- tai pinta-ala-suhteena, kuten kilogrammaa neliometrillä tai tonnia hehtaarilla. Tärkeää on huomioida myös palo- ainesten tiiviys ja jakautuminen, sillä ne vaikuttavat aineksen ilmanvaihtoon ja kosteuteen. Palo- ainekset eivät jakaudu maastossa tasaisesti, vaan voivat muodostaa kasautumia, joiden kosteus poikkeaa yksittäisten kappaleiden kosteuskäyttäytymisestä. Esimerkiksi hakkuutähteet tai heinät voivat käyttäytyä eri tavoin yksittäin kuin kasoina. Pohja- ja maakerroksen aineksen tiiviys vaikuttaa merkittävästi syttymisherkkyyteen. Lisäksi paloaineksen sijoittuminen metsän kolmiulotteisessa rakenteessa määrittää myös sen jatkuvuuden, mikä on tärkeää palon etenemisen kannalta. Vaikka jokin aines olisi helposti syttyvää, palo ei etene, jos sitä esiintyy maastossa vain pistemäisesti. Suomen metsille on tyypillistä paloainesten mosaiikkimainen jakautuminen, minkä vuoksi metsäpalossa palaa lähes aina useaa erilaista ainesta samanaikaisesti. (Lindberg, Heikkilä & Vanha-Majamaa 2011, 35–36.)

Tuuli on yksi merkittävimmistä tekijöistä maastopalon käyttäytymisessä. Se vaikuttaa suoraan palon etenemisnopeuteen, liekkien kokoon ja siihen, mihin suuntaan palo leviää. Yleisesti ottaen voimakas tuuli kiihdyttää palon leviämistä, mutta tämä yhteys ei ole lineaarinen eikä rajaton. Tutkimuksissa on havaittu, että leveämmät palorintamat etenevät nopeammin kuin kapeat, vaikka tuulen nopeus olisi sama. Esimerkiksi 5 m/s tuulella metrin levyinen palo voi edetä 11 metriä minuutissa, kun taas sadan metrin levyinen rintama voi edetä jopa 150 metriä minuutissa. Palon etenemisnopeus kasvaa tuulen nopeuden mukana, kunnes saavutetaan eräänlainen tasanne. Tämän jälkeen lisätuuli ei välttämättä enää kiihdytä paloa, vaan voi jopa hidastaa sitä. Tämä johtuu siitä, että liian voimakas tuuli voi kuljettaa palavien kaasujen seoksia pois liekkivyöhykkeeltä ennen kuin ne ehtivät palaa, mikä vähentää palosta vapautuvaa energiaa ja siten sen leviämiskykyä. Voimakas tuuli voi myös edistää paloa muilla fyysisillä mekanismeilla, kuten kuljettamalla kekäleitä uusille syttymispisteille. Vaikka kipinät saattavat kulkeutua tuulen mukana jopa kilometrejä ja sytyttää uusia tulipaloja kaukana palorintamasta, Sikasen (2009) tutkimuksen mukaan suurin osa kipinöistä kuitenkin laskeutuu noin 10 metrin sisään palorintamasta. Todellisissa maastopaloissa tuulen suunta ja nopeus vaihtelevat jatkuvasti, mikä johtaa siihen, että palo ei käyttäydy tasaisesti. Tämä tekee maastopalojen ennustamisesta erityisen haastavaa. Lisäksi tuulen ja palorintaman leveyden yhdistetty vaikutus tekee ilmiöstä entistä monimutkaisemman. Vaikka tuulen voimakkuus olisi vakio, palorintama pyrkii leviämään ja laajenemaan, jolloin eteneminen kiihtyy ajan myötä. (Finney ym. 2021, 209–211.)

Maastonmuodot vaikuttavat olennaisesti maastopalojen käyttäytymiseen sekä suoraan että epäsuorasti. Rinne vaikuttaa liekin kulmaan ja sen kiinnittymiseen maanpintaan, jolloin liekki painuu lähemmäs palavaa ainetta ja nopeuttaa palon leviämistä ylöspäin. Tämä johtuu siitä, että ylärinteeseen suuntautuva palo saa vähemmän ilmanvirtausta palon yläpuolelta, jolloin ilmapainuun painuu alas rinnettä pitkin ja kallistaa liekin rinnettä vasten. Mitä jyrkempi rinne, sitä voimakkaammin liekki kiinnittyy maahan ja sitä nopeammin palo etenee (kuva 2). Vaikka liekin kiinnittyminen on helposti havaittavissa, sen tarkka ennustaminen on haastavaa, sillä ilmiö syntyy palon ja ilman virtauksen dynaamisesta vuorovaikutuksesta. Kun palo leviää ylärinteeseen, lämmin savu- kaasupatsas synnyttää palon ylle matalapainealueen. Rinteen jyrkentyessä ilmanvirtaus palon

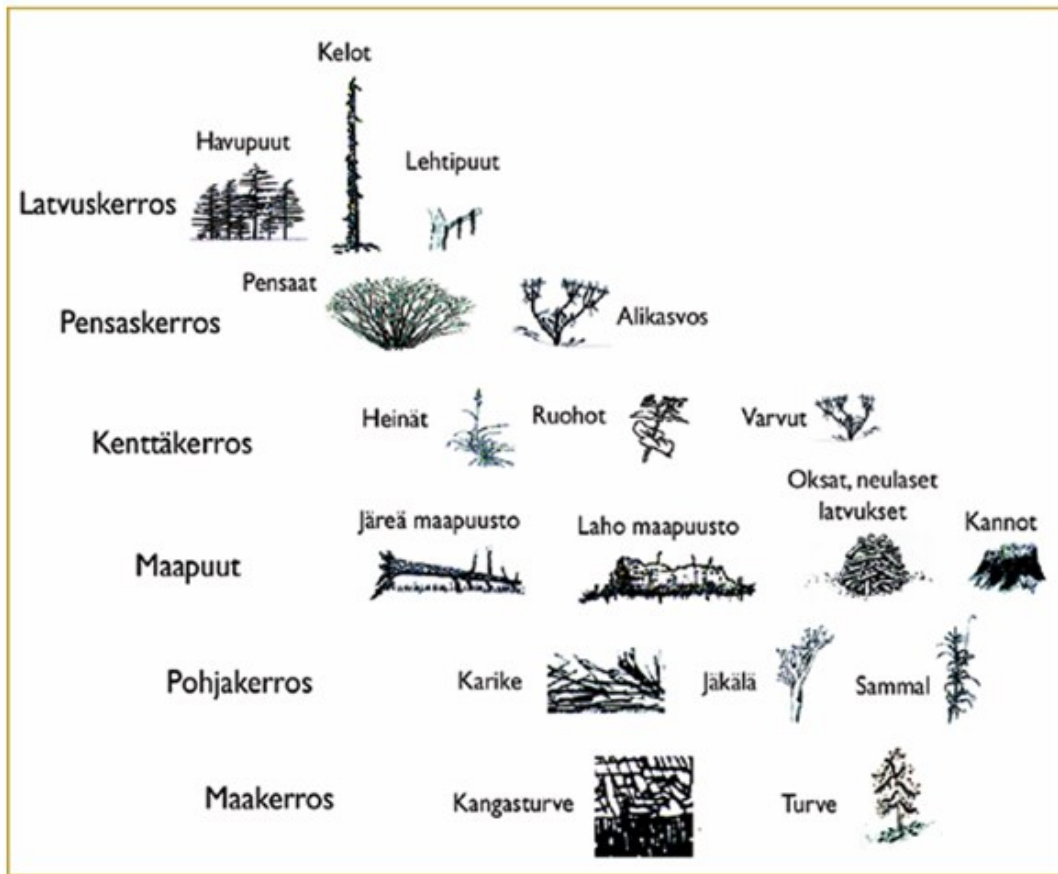
yläpuolelta vähenee ja savukaasut sekä liekki kallistuvat kohti rinnettä. Tämä siirtää matalapaineen keskuksen ylemmäs rinnettä ja kiinnittää liekin maahan. Ilmiö ei ole riippuvainen palon voimakkuudesta vaan maastonmuotojen ja palon leveyden vaikutuksesta ilman virtaukseen. (Finney ym. 2021, 173–177.)



Kuva 2. Kuuma savupatsas havainnollistettuna varjokuvana. Mitä jyrkempi rinne, sitä voimakkaammin se kiinnittyy maahan. (Finney ym. 2021, 173.)

## 2.2 Maastopalojen esiintymismuodot ja metsäkerrokset

Maastopalot voidaan luokitella sen mukaan, missä osassa metsän kerrosta ne palavat. Usein eri palomuodot voivat esiintyä samassa palossa eri olosuhteissa ja eri paloainestyypeillä. Suuressa maastopalossa palomuodot voivat esiintyä myös vaihtelevasti muuttuen esimerkiksi alkavasta pintapalosta latva- tai maapaloksi. Maastopalot usein alkavat pintapaloina, sillä syttymisherkimät paloainekset ovat metsän kuivia pintakerroksen aineksia. Pintapalo (surface fire) etenee polttaen kenttä- ja pohjakerroksen aineksia. Kuvassa 3 on tarkemmin jaoteltu metsän paloainekerrokset sekä metsäpalomuodot ja se missä kerroksissa palo pääasiassa vaikuttaa. Tässä vaiheessa palon ennustaminen ja sammuttaminen on yleensä vielä selkeää. (Lindberg, Heikkilä & Vanha-Majamaa 2011, 21–23.)



Latvapalo	Pintapalo	Maapalo
Latvuserros	Pensas- ja alikasvoskerros	Pohjakerros
Pensas- ja alikasvoskerros	Kenttäkerros	Maakerros
	Pohjakerros	

Kuva 3. Metsän paloaineskerrokset sekä metsäpalomuodot ja kerrokset, joissa palo pääasiassa vaikuttaa (Lindberg, Heikkilä & Vanha-Majamaa 2011, 38).

Maapalo (ground fire) etenee maaperän pohja- ja maakerroksessa, erityisesti silloin, kun maaperä sisältää orgaanisia aineksia, kuten turvetta tai kangashumusta. Koska turve ja muut vastaavat aineet ovat usein tiiviitä ja kosteita, maapalolle on ominaista hidas, kytemällä tapahtuva hehkupalaminen. Nämä aineet voivat palaa pitkiä aikoja, jopa kuukausia tai vuosia, sillä ne pystyvät kuivattamaan ympärillään olevaa kosteatakin maata. Maapalojen sammuttaminen perinteisin vesisammutusmenetelmin on kuitenkin vaikeaa, koska vesi ei pääse palon alla olevaan kerrokseen, vaan jää maapalon pinnalle. Lisäksi palo voi olla lähes näkymätön, mikä tekee sen havaitsemisesta ja sammuttamisesta entistä haasteellisempää. Jäähdyttävän veden saaminen kaikille palopaikoihin on usein mahdotonta. Tämän vuoksi maapalon torjunnassa on järkevää harvita alueen rajaamista aineskatkoilla, sillä maapalo itsessään harvoin on suoraan vaarallinen. Sen suurin uhka on kuitenkin sen kyky säilyä palamassa pitkään ja mahdollisuus levitä pintapaloksi ja edelleen latvapaloksi, jos olosuhteet muuttuvat suotuisiksi. (Lindberg, Heikkilä & Vanha-Majamaa 2011, 23.)

Latvapalo (crown fire) on maastopalo, jossa tuli on noussut puiden latvustoon. Latvapalon syntyminen edellyttää paloainesten pystysuuntaista jatkuvuutta, korkeaa pintapalon voimakkuutta ja usein myös kovaa tuulta. Palon täytyy kyetä siirtymään esimerkiksi pensaskerroksen,

alikasvoskerroksen tai kuivien alaoksien kautta puiden latvustoon ja levitä puusta toiseen. Latvapalo vaatii tiheän latvuserroksen, jotta paloaines on jatkuva. Lisäksi tarvitaan tuulta, joka ylläpitää tätä jatkuvuutta. Latvapalojen syntyyn vaaditaan myös riittävän korkea lämpötila latvuksessa, jotta palo pääsee nousemaan sinne. Joissain tilanteissa tuli nousee vain paikallisesti puista pyrolyysissä irtoavien palokaasujen avulla. Silloin se polttaa yksittäisiä puita tai puuryhmiä, mutta ei leviä laajemmin latvustossa. Tällöin kyseessä on soihutupalo tai passiivinen latvapalo, jossa palo on valmis nousemaan latvuksiin, mutta tuulen tai latvusrakenteen vuoksi se ei kykene leviämään siellä. (Lindberg, Heikkilä & Vanha-Majamaa 2011, 23.)

Aktiivinen latvapalo sen sijaan etenee samanaikaisesti koko metsikössä, sekä latvuksissa että alemmissa kerroksissa. Joskus puhutaan itsenäisestä latvapalosta, jolloin tuli etenee nopeasti latvuserroksessa itsenäisesti tai erillään muista paloalueista. Latvapalon syntyyn voivat vaikuttaa poikkeukselliset sääolosuhteet ja paikallinen korkea palon voimakkuus, joka luo tyypillisen paloilmaston. Nousevat lämpimät ilmavirrat eli konvektiot voivat luoda tulipyörteitä, jotka lisäävät latvapalon ja heitepalojen riskiä. Latvapalon ennustaminen ja ehkäiseminen on metsäpalontorjunnan yksi keskeisimmistä mutta myös haastavimmista tavoitteista, sillä latvapalo on lähes aina korkean intensiteettinen ja vaarallinen. Latvapalon eteneminen myös mahdollistaa palavan aineen kulkeutumisen ilmapirtausten mukana ja leviämisen varsinaisen paloalueen ulkopuolelle heitepalojen muodossa. Latvapalon sammuttaminen on huomattavasti vaikeampaa kuin pintapalon, ja usein paras torjuntataktiikka on rajoittaa ja ohjata paloa alueille, joissa sammutus on mahdollinen. Tällaisia alueita ovat esimerkiksi paikat, joissa paloaineksen jatkuvuus vähenee tai katkeaa. Latvapalojen torjunnassa tärkeää on myös ennaltaehkäisy, erityisesti estämällä pintapalojen nousu latvuksiin. (Lindberg, Heikkilä & Vanha-Majamaa 2011, 23–26.)

## 2.3 Palokatkot maastopalon hallinnassa

Rajoituslinjalla tarkoitetaan linjaa, johon palo pyritään pysäyttämään ja alueelta pyritään poistamaan syttyvä aine sekä sille keskitetään palokunnan resursseja (Sanastokeskus). Rajoituslinjan sijoittelussa tulee huomioida olemassa olevat maaston muodostamat luonnolliset esteet kuten tiet, vesistöt ja kosteikot. Maaston muodot, vuorokauden aika sekä tuulen nopeus vaikuttavat myös rajoituslinjan sijoittelun. Perinteisessä rajoituslinjassa maaperää kaivetaan kivennäismaahan saakka vähintään 4–5 metrin leveydeltä. Rajoituslinjan toimivuutta voidaan lisätä kastelemalla linjaa molemmin puolin. (Laitinen ym. 2022, 9.)

Miehittämättömiä rajoituslinjoja voidaan tehdä käyttämällä esimerkiksi itse tehtyjä vuotavia letkuja, reikäliittimiä tai sadettimia. Itse tehdyn vuotavan letkun voi valmistaa tekemällä paloletkuun kolmelle sivulle noin 80 cm välein hakaneulalla reikiä. Tällöin sumusuihkun halkaisija on noin 120 cm ja vedenkulutus noin 37 litraa minuutissa. Reikäliittimien prototyyppijä on testattu Pelastusopistolla. Vesipaineen mukaan se muodostaa noin 10–15 m leveän märkäalueen ja 5–10 m korkean sadeverhon. Pelastusopiston testissä ollut sadetin puolestaan tuottaa ympyrän muotoisen kastellun alueen, jonka halkaisija on noin 10 metriä. Pumpun tehon ja maastonmuodon mukaan sadetintyyppinen letkulinjajärjestelmä kykenee toimimaan tehokkaana sammutuslinjana 12 letkun matkan. (Laitinen ym. 2022, 9–11.)

Kun maastopaloissa liekin korkeus kasvaa yli 1,2 metrin, on palo liian voimakas käsityövälineillä tehtävään sammutushyökkäykseen ja käsintehty palokuja ei ole enää luotettava (Lindberg, Heikkilä & Vanha-Majamaa 2011, 27).

Rajoituslinjoja voidaan tehdä myös kemiallisilla palonestoaineilla, jotka rajoittavat tai katkaisevat palon etenemisen maastossa. Palonestoaineita käsitellään luvussa 3.

## 2.4 Maastopalon ennustettavuus

Maastopalon etenemiseen vaikuttavat ennen kaikkea palokuorma, polttoaineen kosteuspitoisuus, tuulen nopeus ja suunta sekä maaston muoto. Näiden tekijöiden yhteisvaikutus määrittää sen, kuinka nopeasti ja voimakkaasti palo kehittyy ja leviää. Monien muuttujien vuoksi maastopalon tarkka leviämisen ennustaminen on haastavaa. Erityisesti kuivissa ja tuulisissa olosuhteissa sekä rinteisissä maastoissa palon hallintaan ja ennakkointiin onkin kiinnitettävä erityistä huomiota, sillä palo voi edetä arvaamattoman nopeasti. Tuuli nopeuttaa polttoaineen kuivumista ja lisää hapen saatavuutta, mikä tehostaa palamista. Lisäksi tuuli kuljettaa palavia aineksia ja hehkuvia kekäleitä kauas palon etulinjasta, mikä mahdollistaa uusien palopesäkkeiden syttymisen ja palon hallitsemattoman leviämisen. Tuuli määrää pitkälti palon etenemissuunnan ja voi nopeimmillaan kasvattaa etenemisnopeuden moninkertaiseksi. Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että palon etenemisnopeus kaksinkertaistuu, jos tuulen voimakkuus nousee 4 m/s. Palokuorman kasvaessa myös palon etenemisnopeus ja liekkien korkeus lisääntyvät suorassa suhteessa, mikäli palava materiaali on sijainniltaan ja ominaisuuksiltaan samanlaista. Esimerkiksi kun palokuorma kaksinkertaistuu, myös palon etenemisnopeus ja liekkien korkeus voivat kaksinkertaistua. Kevyen ja ohuen palavan aineksen, kuten heinän ja ruohon, kohdalla tämä suhde voi kuitenkin olla voimakkaampi. Esimerkiksi pintapaloissa etenemisnopeus voi jopa kolminkertaistua, jos palokuorma kaksinkertaistuu. (Kosunen 2020.)

Maaston muoto on merkittävä palon käyttäytymiseen vaikuttava tekijä. Palo etenee aina nopeammin ylärinteeseen kuin alarinteeseen, sillä kuuma ilma ja liekit nousevat ylöspäin ja sytyttävät tehokkaasti ylempänä sijaitsevaa kasvustoa. Rinteiden vaikutus on erityisen suuri, sillä jo 10 asteen lisäys rinteiden kaltevuudessa voi kaksinkertaistaa palon etenemisnopeuden. Myötätuulella palo etenee nopeasti ylärinteeseen. Myös vastatuulella palo voi nousta rinnettä ylös, kunnes se saavuttaa rinteiden lakipisteen, jossa tuuli hidastaa tai pysäyttää etenemisen. Alarinteeseen palo etenee hitaammin, mutta myötätuulella ylärinteeseen noussut palo voi singota kipinöitä, jotka sytyttävät uuden palon alarinteeseen. (Kosunen 2020.)

Eri metsäpalotyypeillä on omat etenemisnopeutensa. Pintapalo etenee maaston kasvillisuuden ja tuulen mukaan yleensä 100–1000 metriä tunnissa eli noin 5–15 metriä minuutissa. Latvapalo, joka on vaikein hallita ja sammuttaa, voi edetä 1–2 kilometriä tunnissa eli 15–30 metriä minuutissa. Latvapalossa syntyy valtava kuumuus, joka nostattaa ilmaan voimakkaita ilmapirtauksia. Tuli alkaa tällöin ruokkia itseään, palo etenee erittäin nopeasti ja muuttuu helposti suurpaloksi. Tuulen vaikutuksesta palava materiaali voi kulkeutua pitkiäkin matkoja ja sytyttää uusia paloja, jolloin tilanne muuttuu nopeasti hallitsemattomaksi. Maastossa esiintyvät luonnonesteet vaikuttavat palon etenemiseen hidastavasti tai pysäyttävästi. Tällaisia esteitä ovat esimerkiksi järvet, joet, kosteikot, suot, pellot ja lehtipuumetsiköt, joissa palaminen on vaivalloista tai mahdotonta. Kuitenkin myös näiden esteiden ylitys on mahdollista erityisesti latvapalojen ja kipinästateiden kautta. (Kosunen 2020.)

Metsäpaloriskin asiantuntijajärjestelmissä käytetään nykyisin latvapaloriski-indeksiä tai kynnyсарvoja arvioitaessa latvapaloriskiä. Tämä indeksi muodostetaan muuttujilla, jotka vaikuttavat latvapalon syntyyn, kuten paloaineen määrä ja laatu, tuulen voimakkuus, latvuskerroksen tiheys, kosteus ja etäisyys latvuskerrokseen. Samoin heitepaloriskiä voidaan arvioida malleilla, joissa

olennaista on ymmärtää, minkä kokoisia kipinöitä syntyy, kuinka ne jäähtyvät ja kuinka pitkälle ne kulkeutuvat. Korkeaintensiteettisissä paloissa ilmapvirtausten mukana kulkeutuvat suuret palapaaleet, jotka jäähtyvät hitaammin ja säilyttävät sytyttämiskyvyn pidempään. Esimerkiksi senttimetrin läpimittaiset kipinät voivat helposti aiheuttaa heitepalon, kun taas pienemmät palapaaleet eivät välttämättä sytytä ympäröivää maata. Heitepaloriskiä kannattaa pitää mielessä erityisesti keski-intensiteettisissä paloissa, koska kipinöiden leviämiskatku voi olla merkittävä myös silloin. (Lindberg, Heikkilä & Vanha-Majamaa 2011, 26.)

Maastopalojen olosuhteita ja palojen käyttäytymistä on tutkittu melko vähän suomalaisessa metsätaloudessa. Useita erilaisia mallinnusmenetelmiä on kuitenkin kehitetty maissa, joissa maastopalot ovat toistuva ja vakava ongelma. Valmiin tiedon ja mallien siirtäminen Suomeen ei kuitenkaan ole yksinkertaista. Haasteita tuovat muun muassa erilainen maasto, kasvillisuus, sääolosuhteet, vuodenaajat, kulttuuri sekä käytössä oleva välineistö. Palon leviämistä mallintavat ohjelmistot vaihtelevat yksinkertaisista monimutkaisiin. Perusmalleissa palon eteneminen lasketaan siirtymisenä solusta toiseen perustuen viereisen solun palamiseen. Kehittyneemmät mallit vaativat huomattavaa laskentatehoa, sillä ne mallintavat kolmiulotteisia ilmapvirtauksia, fysiikan eri ilmiöitä ja energiansiirtymistä. Yksinkertaistettuna maastopalojen leviämisen mallintamisessa tarvitaan erityisesti metsän ominaisuustietoja ja sää tietoja. Mallien tavoitteena on kuvata alueen palo-ominaisuuksia ja niiden vaihtelua mahdollisimman tarkasti. Paikallisia sää tietoja käytetään muun muassa palavan aineksen kosteuden ja palon leviämisen arvioinnissa. Erityisenä haasteena on, että suurten ja voimakkaiden maastopalojen tiedetään voivan luoda oman mikroilmastonsa. Tällöin voi syntyä esimerkiksi vaarallisia tulipyrönteitä, joita kaikki mallit eivät kykene ennustamaan etukäteen. (Fernandez-Anez & Węgrzyński, 2024; Hillberg 2020, 45–47.)

Operatiivisessa toiminnassa mallinnusohjelman tulisi olla mahdollisimman yksinkertainen ja helppo käyttää. Lisäksi sitä tulisi voida käyttää tietokoneella, tabletilla sekä puhelimella. (Hillberg 2020, 59). Suomessa maastopalon leviämistä mallintavien ohjelmien käyttöä on tutkittu ja kehitetty esimerkiksi MAST- ja MARISKA-hankkeissa. MAST-hankkeessa otettiin käyttöön Prometheus -leviämismalli, jota testattiin luokahuoneolosuhteissa maastopaloskenaarioissa sekä kehitettiin myöhemmin Kalajoen metsäpalon jälkianalyysin perusteella. (Puustinen ym. 2022.) Suomen metsäkeskus on kehittänyt pelastusviranomaisten avuksi metsäpalokarttoja, joissa näkyy, missä palo todennäköisemmin syttyy ja miten se uhkaa levitä maastossa. Teemakartoissa näkyvät myös esimerkiksi sammutusveden lähteet, rinteiden kaltevuudet, maaperän kosteus ja tiiverkosto. (Köngäs 2020.)

Maastopalojen ennaltaehkäisyssä Ilmatieteen laitoksella ja maastopalovaroitusjärjestelmällä on merkittävä rooli. Maastopalovaroitusjärjestelmän tarkoituksena on varoittaa yleisöä ja viranomaisia maastopaloista aiheutuvasta vaarasta. Varoituksen antaa Ilmatieteen laitoksen päivystävä meteorologi, joka arvioi paloherkkyyttä säähavaintojen, sääennusteiden ja maaston kuivuutta mittavaan indeksin avulla. Indeksi perustuu Ilmatieteen laitoksen kehittämään laskentamalliin, joka arvioi humuskerroksen pintakosteutta puuttomilla alueilla, kuten avohakkuilla. Nämä alueet kuivuvat nopeasti ja ovat siksi erityisen alttiita syttymään. Malli huomioi eri vuodenaikojen vaikutuksen maaperän kosteuteen. Maastopaloindeksin laskennassa käytetään hilapohjaista menetelmää, jossa koko Suomi jaetaan 10 x 10 km kokosiin hilaruutuihin. Jokainen ruutu saa oman arvionsa sääolosuhteiden ja maaston paloherkkyyden mukaan. Laskennan taustatietoina hyödynnetään ilman suhteellista kosteutta, tuulen nopeutta, ilman lämpötilaa, auringon säteilyä sekä sademäärää. Lisäksi Ilmatieteen laitoksen ILMANET-palvelussa on pelastustoimelle käytettävissä palokaasujen leviämismalli, metsäpalohiukkasten kaukokulkeumamalli ja testiversio metsäpalon leviämismallista. Näitä palveluita kehitetään koko ajan vastamaan paremmin operatiivisia

tarpeita. Ilmatieteen laitoksen asiantuntijoita voidaan myös hyödyntää esimerkiksi johtokeskustyöskentelyssä (Ilmatieteen laitos; Mänttari 2022, 19.)

Laajojen maastopalojen hallinnassa miehittämättömien ilma-alusten (UAS) käyttö on nykyisin keskeinen osa pelastustoimintaa. Droneyksiköiden käyttö on perusteluta ja tarkoituksen mukaan jo heti alkuvaiheessa, etenkin jos olosuhteet ennustavat nopeaa leviämistä. Ilmatiedustelu tarjoaa reaaliaikaista ja tarkkaa tilannekuvaa, jota voidaan tehokkaasti hyödyntää sammutustoiminnan suunnittelussa. Lisäksi valmiit toimintamallit erikokoisten maastopalojen hallintaan nopeuttavat ja selkeyttävät pelastustoimintaa. (Mänttari 2022, 20.) Tulevaisuudessa dronella ja tekoälyllä mahdollisesti pystytään myös havaitsemaan ja kohdentamaan maastopalot nykyistä aiemmin ja paremmin. Tämä vaatii kuitenkin vielä kehitystyötä muun muassa niukan maastopalodataan vuoksi, jolla tekoälyä voidaan opettaa. (Tarvainen 23, 14.)

Maastopaloissa ennakointi ja varautuminen on tärkeässä osassa. Metsäpalovarautuminen pelastuslaitoksilla 2025-hanke on Pelastusopiston ja Suomen metsäkeskuksen yhteinen hanke, jonka tavoitteena on avustaa pelastuslaitoksia metsäpalojen toruntasuunnitelmien teossa ottaen huomioon eri pelastuslaitosten erityistarpeet. Hankkeen avulla myös arvioidaan metsäpalokoulutustarvetta sekä tuotetaan uutta koulutusmateriaalia sekä ohjeistusta. (Pelastusopisto.)

## 3 Maastopaloissa käytettävät kemialliset aineet

Vesi on maailmanlaajuisesti yleisimmin käytetty sammutusaine. Vaikka vesi on erittäin tehokas tulipalojen sammuttamisessa, sen tehoa voidaan parantaa kemiallisilla lisäaineilla. Yksinään käytettynä vesi haihtuu helposti kuumuuden ja tuulen vaikutuksesta, mikä vähentää sen tehoa huomattavasti. Suomenkielistä tietoa maastopaloissa käytettävistä palonestoaineista on hyvin vähän löydettävissä. Suomessa maastopaloissa yleisimmin käytössä olevat kemialliset aineet lienevät olevan veden pehmentimet. Ulkomaalaisissa lähteissä palonestoaineet jaetaan usein käyttötavan perusteella suorassa ja epäsuorassa hyökkäyksissä käytettäviin aineisiin. Useiden lähteiden perusteella samoja aineita voidaan käyttää molemmissa hyökkäystavoissa palon luonteen ja alueen erityispiirteiden mukaan. Maastopaloissa käytettävät kemialliset aineet voidaan jakaa myös esimerkiksi pitkävaikutteisiin palonestoaineet (long-term fire retardants), A-luokan vaahtoihin (class A foams) ja vettä tehostaviin geeleihin (Dong ym. 2024).

### 3.1 Palonestoaineiden historia ja koostumus

Yhdysvalloissa on jo vuosikymmenien ajan taisteltu suuria maastopaloja vastaan. 1950-luvulla toteutettiin Operaatio Firestop, joka oli laaja tutkimus tulipalojen torjuntakemikaalien tehokkuudesta Yhdysvaltain metsäpalvelun ja muiden organisaatioiden yhteistyönä. Tutkimuksessa testattiin muun muassa paloa hidastavia kemikaaleja ja erilaisia sammutusmenetelmiä. Ammoniumfosfaatti osoittautui tehokkaimmaksi palon voimakkuuden vähentämisessä, kun taas boorihappo, magnesiumkloridi ja polyvinyyliasetaatti olivat tehottomimpia. Boraatteja käytettiin hidastimissa vain pari vuotta, koska ne todettiin myrkylliseksi maaperälle. Fosfaattipohjaisista hidastajista tuli alan standardi. Vuonna 1970 tutkimuksessa vahvistettiin ammoniumfosfaattien tehokkuus, erityisesti diammoniumfosfaatin, kun taas kaliumkloridi todettiin vähiten tehokkaaksi. Fosfaattipohjaiset hidastimet tunnustetaan edelleen tehokkaimmiksi maastopalonsuoja-aineiksi, koska ne tarjoavat paremman talteenottoasteen kuin vesi tai muut kemialliset liuokset. Ne lisäävät sammutustehokkuutta ja ehkäisevät uudelleensyttymistä tekemällä polttoaineesta palamattoman. (Goldberg 2022.)

Kemialliset aineet voivat auttaa sammuttamaan tulipalon neljällä tavalla:

- sammuttamalla liekin heti kosketuksessa,
- estämällä tai hidastamalla syttymistä,
- vähentämällä palon voimakkuutta,
- tekemällä polttoaineen palamattomaksi kemiallisen reaktion kautta.

Palonestoaineet koostuvat yleensä vedestä (80–85 %), lannoitesuoloista (10–15 %) sekä lisäaineista (5–10 %). Veden tarkoituksena on aineiden kuljetus haluttuun kohteeseen. Lannoitteena voidaan käyttää esimerkiksi ammoniumfosfaattia, ammoniumsulfaattia, monoammoniumfosfaatti, natriumsilikaatti, ammoniumkloridi, magnesiumkloridi ja kaliumformiaattia. Lähes kaikkia palonestoaineissa käytettyjä lannoitesuoloja käytetään yleisesti myös maatalouslannoitteina. Lisäaineet, kuten sakeuttajat ja väriaineet, parantavat nesteen viskositeettia ja tarttuvuutta kasvillisuuteen sekä aineen näkyvyyttä. (Perimeter Solutions 2022.)

## 3.2 Suora hyökkäys

Suorassa hyökkäyksessä palonestokemikaaleja pudotetaan suoraan aktiivisille liekeille tai palaville alueille palon voimakkuuden vähentämiseksi nopeasti. Tämä menetelmä toimii alentamalla palamislämpötilaa ja muuttamalla kemiallisia reaktioita tulen sisällä, olennaisesti tukahduttamalla sen ja katkaisemalla sen polttoainelähteen. (RDR Technologies.)

Suomessa esimerkiksi turvetuotantoalueilla palavan turpeen sammuttamiseen käytetään pehmenettyä eli niin sanotusti "märkää" vettä. Vesi pehmenetään lisäämällä siihen 0,3–0,5 % saippuapohjaista ympäristöystävällistä ja emäksistä ainetta. Liiallinen vedenpehmentimen käyttö voi kuitenkin vaikeuttaa sammutusta, sillä se lisää vaahdon muodostumista. Käytännössä veden pehmentäminen tehdään lisäämällä esimerkiksi mäntyöljysaippuaa sammutusvesisäiliöön, josta se pumpataan palokohteeseen. (Salo 2009, 40.)

## 3.3 Epäsuora hyökkäys

Epäsuoriin hyökkäyksiin kuuluu palonestokemikaalien levittäminen palamattomille alueille ennen palo rintaman saapumista. Palonestoaineet tarttuvat kasvillisuuteen ja tekevät siitä vähemmän syttyvää, mikä vähentää merkittävästi leviämismahdollisuutta tulen edetessä alueelle. Palonestoaineilla tehtyjä palokatkoja käytetään tyyppillisesti, kun palon reitti on ennustettavampi. Epäsuorat hyökkäykset ovat erityisen tehokkaita vaikeassa maastossa tai alueilla, joilla suorat hyökkäykset olisivat liian riskialttiita tai vähemmän tehokkaita. (RDR Technologies.)

## 3.4 A-luokan vaahdot ja geelit

Sammutusvaahdot luokitellaan A- ja B-luokan vaahtoihin. A-luokan vaahtoja käytetään veden pintajännityksen alentamiseen, jolloin vesi tunkeutuu paremmin huokoiseen materiaaliin. B-luokan vaahtoja puolestaan käytetään palavien nesteiden paloissa. B-luokan vaahdot tekevät kalvon palavan nesteen pinnalle ja estää aineista muodostuvien kaasujen syttymisen. (Nyman 2018, 29.)

Maastopalon sammuttamisessa haasteita voi aiheuttaa maaperä ja sen kyky ottaa vettä vastaan. Esimerkiksi kuiva kunnattaa läpäisee veden maan alempiin kerroksiin, jolloin veden teho sammutteena jää heikoksi. Kuivan turpeen pinnalle vesi puolestaan jää ikään kuin kellumaan. A-luokan vaahdot (class A foams) sisältävät ainesosia, jotka muuttavat veden fysikaalisia ominaisuuksia tehokkuuden ja maa-ainekseen tarttuvuuden lisäämiseksi. Sammutusvaahtoa voidaan käyttää tehostamaan veden kykyyn tunkeutua ja pysymään maan pintakerroksissa. (U.S. Department of Agriculture.) Vaahtoja käytetään pääasiassa palon sammutuksessa tai jälkiraivauksessa. Vaahtojen teho perustuu yksinomaan niiden sisältävään veteen. Vaahdot sammuttavat tulen nopeasti peittämällä palavan aineen, mutta niiden teho on rajoitettua, koska veden haihduttua aine menettää vaikutuksensa. Lisäksi monet vaahdot sisältävät per- ja polyfluoratuja yhdisteitä (PFAS), jotka parantavat vaahdon kiinnittymistä ja veden tunkeutumista pintoihin. Nämä aineet ovat kuitenkin ympäristölle haitallisia. (Dong ym. 2024.) Maaperän pohjakerroksen paloissa vaahdot ovat hyödyllisiä, koska ne tunkeutuvat tuleen ja mahdollistavat syvälle ulottuvan sammuttamisen. (Perimeter Solutions 2022.)

Vettä tehostavat geelit ovat ympäristöystävällisempi vaihtoehto, sillä ne koostuvat superimukykyisistä polymeereistä. Geelit pystyvät pitämään vettä jopa 30–60 minuuttia. Tämä pidempi

vedenpidätysaika tekee geeleistä erityisen tehokkaita suojaamaan rakennuksia ja infrastruktuuria maastopalojen aikana. Geelit toimivat erityisen hyvin epäsuorissa hyökkäyksissä, joissa halutaan estää tulen leviämistä etukäteen. Vettä tehostavat geelit ovat myös kestävämpiä ja vähemmän haitallisia ympäristölle verrattuna perfluorattuihin aineisiin. (Dong ym. 2024.)

### 3.5 Pitkävaikutteiset palonestoaineet

Pitkäkestoiset palonestoaineet (long-term fire retardants) vähentävät palon intensiteettiä ja estävät palon leviämistä tekemällä polttoaineesta kemiallisesti palamattoman. Kun palonestoaine kuumenee, kemiallinen reaktio tuottaa vesihöyryä ja vähentää syttyvien kaasujen määrää. Lopputuloksena muodostuu grafiittimainen hiilikerrok, joka estää palon syttymisen. Vaikka vesi haihtuu liuksesta pois, jatkavat palonestoaineet vielä syttymisen ja liekkien leviämisen estämistä. Vaikutukset voivat kestää viikoista jopa kuukausiin, kunnes esimerkiksi sade huuhtelee palonestoaineet maahan. Pitkäkestoisia palonestoaineita käytetään yleensä luomaan palokatkoja, mutta niitä voidaan käyttää myös suorassa sammutuksessa. (Dong ym. 2024; Perimeter Solutions 2022; U.S. Department of Agriculture.)

### 3.6 Ympäristövaikutukset

Yhdysvalloissa palonestoaineiden käyttö maastopaloissa on melko yleistä. Esimerkiksi kahdeksan vuoden aikana siellä käytettiin yli 385 miljoonaa litraa palonestoaineita maastopalojen hallinnassa. Erilaisista testauksista ja tutkimuksista huolimatta palonestoaineiden ympäristöystävällisyys on kiistanalainen kysymys. Vaikka fosfaattipohjaiset hidastimet ovat tehokkaita palonsuojia, niiden käyttöön liittyy ympäristöriskejä. Hidastimet voivat vahingossa päätyä rajoitetuille alueille, kuten vesistöihin tai uhanalaisten lajien elinympäristöihin, erityisesti lentolevityksen yhteydessä. Vesistöihin joutuessaan hidastavat aineet, erityisesti ammoniakki, voivat aiheuttaa vakavia haittoja kaloille ja muille vesieläimille sekä edistää haitallisia leväkukintoja. Erityisen haitallista on ammoniakkipitoisten hidastimien joutuminen pieniin vesistöihin, joissa se voi aiheuttaa nopean kala-kuoleman. Lisäksi lannoitekomponentti, kuten fosfori, kiihdyttää leväkukintoja ja vähentää hapen määrää vedessä. Lisäksi palonestoaineiden savun yhteisvaikutuksia maastopalojen savuun ei ole tutkittu riittävästi. Vuonna 2017 Kalifornian yliopiston kirjallisuuskatsaus totesi, että terveysvaikutuksiin liittyvä tutkimus on edelleen puutteellista. Kirjallisuuskatsauksessa todettiin, että olisi tarpeen tutkia tarkemmin, miten palonestoaineet vaikuttavat palokaasujen koostumukseen ja terveysriskeihin erityisesti kaupunkialueilla. (Spanne 2021.)

Useimmat pitkäkestoiset palonestoaineet sisältävät kuitenkin maataloudessa yleisesti käytettäviä lannoitteita. Kun lannoitteet huuhtoutuvat sateen mukana maaperään, saa maaperä hyödyllisiä ravinteita ja alueet alkavat kasvavaan uudelleen nopeammin. (RDR Technologies.)

Yhdysvalloissa vain ne hidastimet, jotka ovat Yhdysvaltain metsäpalvelun (USFS) hyväksytyjen tuotteiden luettelossa (QPL), ovat sallittuja liittovaltion mailla. Ennen hyväksyntää USFS arvioi palonestoaineet kattavasti. Ne testataan nisäkkäiden ja kalojen myrkyllisyyden osalta, arvioidaan ihmisille aiheutuvat riskit ja varmistetaan kemiallinen koostumus sekä sammutustehokkuus. Vain QPL-listatut tuotteet ovat todistetusti turvallisia ja tehokkaita. Jos palonestoaine ei ole listalla, sen ympäristövaikutuksista ei ole takeita. (Goldberg 2022.)

Suomessa kemikaalisäädöksissä ei ole varsinaista lupamenettelyä palonestoaineiden markkinoille hyväksymiselle. Euroopan kemikaalivirasto kuitenkin rajoittaa, millaisia aineosia

palonestoaineissa ei saa käyttää. REACH-asetus on Euroopan unionin säädös, jonka tavoitteena on suojella terveyttä ja ympäristöä kemikaalien aiheuttamilta riskeiltä ja parantaa EU:n kemikaaliteollisuuden kilpailukykyä. Asetus edistää myös vaihtoehtoisten menetelmien kehittämistä kemikaalien vaarojen arvioimiseksi vähentäen eläinkokeiden määrää. REACH koskee kaikkia kemiallisia aineita, joita käytetään teollisuudessa tai päivittäisessä elämässämme, kuten puhdistusaineet, maalit, vaatteet ja sähkölaitteet. (ECHA.)

## 4 Ennaltaehkäisevien aineiden testit

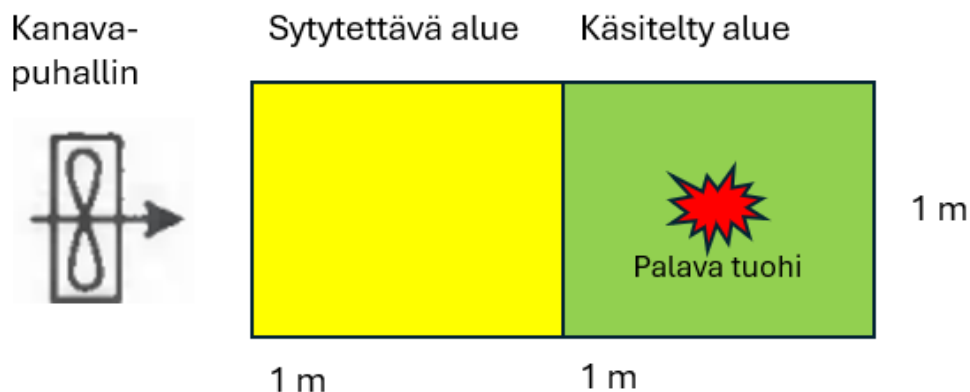
### 4.1 Tutkimuskysymykset ja polttokokeiden valmistelut

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli testata kahta maastopaloissa käytettävää paloa ennaltaehkäisevää ainetta. Tarkoituksena oli selvittää laboratorio-olosuhteissa ennaltaehkäisevien aineiden tehokkuutta erityisesti maastopalon rajoittamisessa tai palon katkaisemisessa verrattuna pelkkään veteen. Tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- Estääkö ennaltaehkäiseväaine maa-aineksen syttymisen?
- Ovatko testattavat aineet tehokkaampia syttymisen estämisessä kuin pelkkä vesi?
- Olisiko ennaltaehkäisevät aineet käytännössä toimivia ja minkälaisissa tilanteissa niitä kannattaisi käyttää?

Testattavat aineet nimettiin aine 1, aine 2 ja vesi. Käytännön testit tehtiin kahtena peräkkäisenä päivänä Pelastusopiston paloteatterilla tammikuun 2025 puolella välissä. Lisäksi yksi päivä varattiin valmisteluihin ja laitteiston testaukseen ennen varsinaisia testaus päiviä. Poltettavana materiaalina käytettiin kunttaa. Koepoltoissa käytettävä kunta oli viikon sisätiloissa, jotta se olisi mahdollisimman kuivaa ja simuloisi maastopalo herkkää maa-ainesta. Kuntan kosteusprosentti tässä vaiheessa oli 55,4 %. Viimeisen vuorokauden ajan leikatut kunnatpalat olivat polttotilassa, jossa oli kolme rakennuspuhallinta sekä lattialämmitys. Tässä vaiheessa kuntan kosteusprosentti oli 51,4 %. Kosteusprosentti laskettiin punnitsemalla pieniä kunnatpaloja. Kunnatpaloja kuivattiin leivinuunissa matalalla lämmöllä noin kaksi vuorokautta, kunnes ne eivät enää menettäneet painoaan. Maastopaloille otolliset tuuli olosuhteet luotiin kahdella kanavapuhaltimella. Ilmavirtausmittarilla (Airflow TA430) säädettiin ilmavirtaus 5–6 m/s mitattuna 10 cm kanavapuhaltimien suulta. Lämpötila polttotilassa oli 14–16 °C testien aikana ja kosteusprosentti oli 51–55 %. Ulkona oli ensimmäisenä testipäivänä poutaa ja lämpötila oli muutaman asteen verran pakkasella. Toisena testipäivänä ulkona oli poutaa ja muutaman asteen lämmintä.

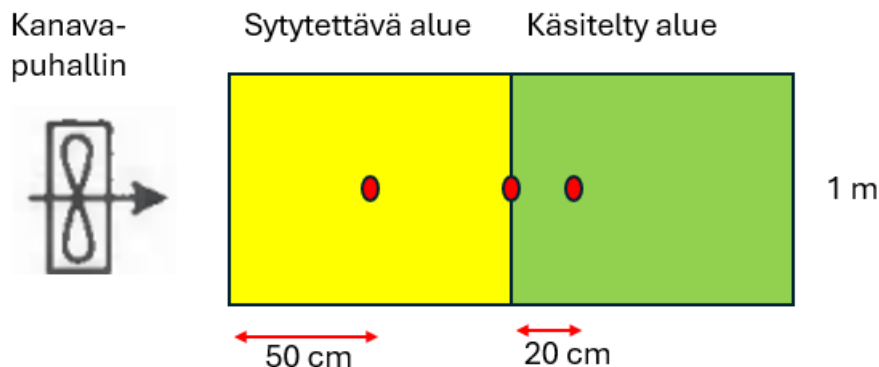
Polttokokeita varten kunnatmatosta leikattiin yhden neliömetrin kokoisia paloja, jotta niiden käsittely ja siirtäminen olisi helpompaa. Näistä neliömetrin kokoisista paloista koottiin kahden neliömetrin kokoisia kunnatpaloja yhteensä kymmenen kappaletta. Puolet kahden neliömetrin kunnatpalasta käsiteltiin paloa ennaltaehkäisevällä aineella polttokoetta edeltävänä päivänä klo 15:30. Molempina testipäivänä ensimmäiset polttokokeet aloitettiin kello 10 aikaan ja viimeiset klo 13:30. Molemmat ennaltaehkäisevät aineet kerkesivät siis kuivahtaa vajaan vuorokauden. Pelkällä vedellä käsitelty alue kasteltiin hieman ennen polttokokeen aloitusta. Käsittelemätön alue sytytettiin tuleen ja kanavapuhaltimella ohjattiin paloa kohti käsiteltyä aluetta. Polttokoejärjestelyjä on havainnollistettu kuvassa 4. Heitteiden aiheuttamaa palon leviämistä simuloitiin palavalla tuohella, joka oli käsitellyn alueen keskellä.



Kuva 4. Polttokoe järjestelyt.

Aine 1 polttokokeet tehtiin ensimmäisenä testipäivänä ja aine 2 polttokokeet toisena testipäivänä. Molemmilla aineilla oli tarkoitus tehdä kolme samanlaista koepolttoa, jotta polttotesteihin saataisiin toistettavuutta ja luotettavuutta. Molempina päivinä kahden ensimmäisen koepolton aikana tehtiin samaan aikaan vedellä käsitelty koepoltto, jotta vertaaminen olisi helpompaa. Vedellä käsiteltyjä koepolttoja suoritettiin yhteensä neljä. Testien aikana koejärjestelyitä jouduttiin kuitenkin muuttamaan.

Kaikki polttokokeet kuvattiin tallentavalla videokameralla. Käytössä oli myös tallentava lämpökamera. Lisäksi kuntaan laitettiin termoparilanka ja dataloggeri, jolla saatiin mitattua kunnan lämpötiloja kolmesta eri kohdasta. Lämpötilaa mitattiin sytytettävän alueen keskeltä, rajoituslinjasta sekä käsitellyltä alueelta 20 cm rajoituslinjasta (kuva 5).



Kuva 5. Lämpötila-antureiden (punaiset pisteet) sijainnit.

Paloa ennaltaehkäisevät aineet sekä vesi levitettiin kuntaan kastelukannulla (kuva 6). Ennen aineiden levitystä testattiin, kuinka aine virtaa kastelukannusta. Näin saatiin aine levitettyä mahdollisimman tasaisesti käsiteltävälle alueelle. Aine 2 oli viskositeetiltaan hyvin lähellä vettä ja levitettävä ainemäärä melko pieni. Ensimmäiseen polttokokeeseen aine 2 levitettiin käsikäyttöisellä paineruiskupullolla (kuva 6). Tämä tapa oli kuitenkin kastelukannuun verrattuna hyvin hidasta, joten toisen ja kolmannen polttokokeen kohdalla palonehkäisyaine levitettiin kastelukannulla. Aineiden viskositeetti mitattiin DIN 4 tyyppisellä viskositeetti mittarilla. Aineella 1 valmistajan

ohjeen mukaan riittävä ainemäärä on 2–5 l/m<sup>2</sup> maa-aineksen mukaan. Näissä polttokokeissa ainetta 1 levitettiin 3,5 l/ m<sup>2</sup> kaikkiin kolmeen polttoon. Samalla periaatteella toimittiin toisen ennaltaehkäisevän aineen kanssa. Valmistajan ohjeen mukaan aineen 2 käytettävä määrä on 0,5–1,5 l/m<sup>2</sup>. Ainetta 2 oli kokonaisuudessaan käytettävissä vajaa 3 litraa, joten sitä levitettiin 0,9 l/ m<sup>2</sup> kaikkiin kolmeen testiin. Koska testattavia aineita verrattiin veteen, päädyttiin vettä käyttämään ensimmäisen päivän kahdessa ensimmäisessä polttokokeessa 3,5 l/m<sup>2</sup> ja toisena päivänä kahdessa ensimmäisessä polttokokeessa 0,9 l/ m<sup>2</sup>.



Kuva 6. Aineiden levitys tehtiin kastelukannulla ja paineruiskupullolla.

Valmistelu päivänä testattiin käsittelemättömän kunnan syttyminen. Kunta sytytettiin kaasupolttimella. Kunnan sytyttämisessä reunasta alkaen havaittiin haasteita. Syttymisen apuna päädyttiin käyttämään sytytysnestettä. Lisäksi testattiin heitteenä käytettävän tuohen toimivuutta käsittelemättömään kuntaan. Kuiva koivutuohi laitettiin kunnanpäälle ja sytytettiin kaasupolttimella. Tuli levisi kuntaan (kuva 7).



Kuva 7. Sytytetystä koivutuohesta palo levisi käsittelemättömään kuntaan noin minuutissa.

## 4.2 Tulokset

### 4.2.1 Ennaltaehkäisevien aineiden ominaisuudet

Ennaltaehkäisevien aineiden sekä veden viskositeettia testattiin DIN 4 tyyppisellä mittarilla. Mittarilla testattiin kuinka kauan 100 ml ainetta valui 4 mm kokoisesta reiästä. Mittaukset toistettiin viisi kertaa ja näistä laskettiin keskiarvo. Aine 1 oli selkeästi jäykempää kuin aine 2 ja vesi (kuva 9). Aine 2 ja vesi puolestaan olivat viskositeetiltaan hyvin samankaltaisia. Lisäksi testattiin kuinka aineet valuvat 3 mm ja 2 mm reiästä. Kaikki aineet olivat mittaushetkellä huoneenlämpöisiä.

Taulukko 2. Aineiden viskositeetti.

	<b>Aine 1</b>	<b>Aine 2</b>	<b>Vesi</b>
<b>Aika 4 mm reikä</b>	18,8 s	14,3 s	14,2 s
<b>Aika 3 mm reikä</b>	49,6 s	38,6 s	35,2 s
<b>Aika 2 mm reikä</b>	keskeytetty	1 min 22,7 s	1 min 14,5 s

Aine 1 levitettiin kaikkiin kolmeen testeissä käytettäviin kunttapaloihin kastelukannulla. Käytettävän aineen määrä oli 3,5 litraa ja se oli helppo saada tasaisesti yhden neliömetrin alueelle. Kuvuessaan käsitelty alue muuttui vaaleaksi ja se oli selkeästi havaittavissa (kuva 8).



Kuva 8. Vasemmalla etualalla vedellä käsitelty alue ja oikealla etualalla aine 1 käsitelty alue. Taka-alalla käsittelemättömät alueet.

Aineen 2 kohdalla käytettävän aineen määrä oli vain  $0,9 \text{ l/m}^2$ . Ensimmäiseen testiin aine levitettiin paineruiskupullolla. Aine saatiin näin erittäin tasaisesti käsiteltävälle yhden neliömetrin alueelle. Levittäminen oli kuitenkin erittäin hidasta, eikä se pelastustoimen kaluston ja toiminnan näkökulmasta olisi tarkoituksenmukaista. Toiseen ja kolmanteen testiin aine levitettiin kastelukannulla. Ennaltaehkäisevää ainetta ei saatu niin tasaisesti alueelle kuin aine 1 (kuva 9). Myös sama määrä verrokkina toimivaa vettä levitettiin kastelukannulla. Kuivuessaan aine 2 näytti kunnassa vain hieman tummemmalta, ikään kuin kosteana alueena. Testiolosuhteissa se oli havaittavissa, mutta maasto-olosuhteissa aineen havaitseminen olisi todennäköisesti haastavaa.



Kuva 9. Aine 2 levitettynä kastelukannulla molempiin kunnatpaloihin. Oikeassa yläkulmassa hieman käsittelemätöntä kuntaa näkyvissä.

Aineiden levittämisen jälkeen kastelukannun suutin jätettiin huuhtelematta ja aine jätettiin kuivumaan suuttimeen vuorokaudeksi. Molemmista aineista jäi kuivuessaan selkeät jäämät suuttimeen (kuva 10). Suuttimet huuhdeltiin kylmällä vedellä. Molemmat ainejäämät saatiin huuhdeltua kylmällä vedellä, mutta aine 1 vaati pidemmän huuhteluajan kuin aine 2. Kuivuessaan aine 1 jätti hieman pölymäisen käsittuntuman, kun aine 2 puolestaan tuntui hieman tahmealta kuivumisen jälkeen.



Kuva 10. Ennaltaehkäisevät aineet kuivuneet kastelukannun suuttimessa yhden vuorokauden.

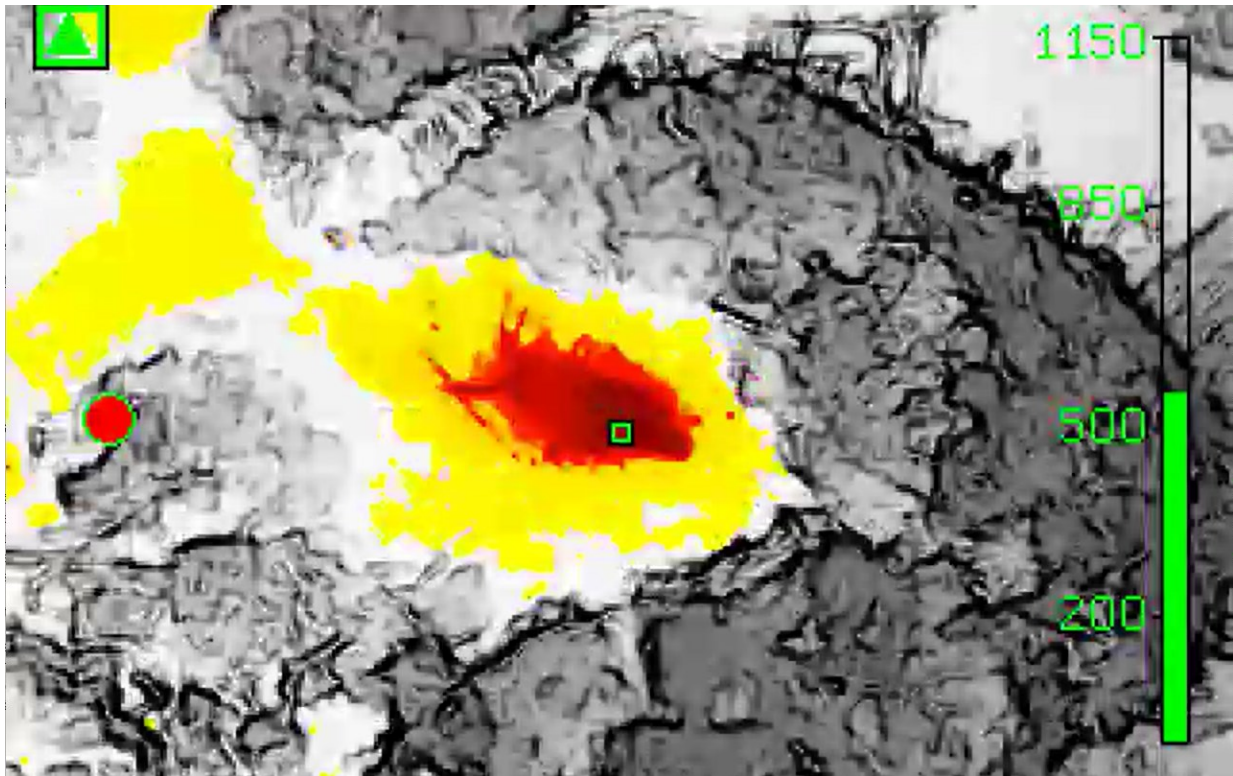
#### 4.2.2 Ensimmäinen polttokoepäivä

Ensimmäinen polttokoe tehtiin alustavan suunnitelman mukaan. Sytytyksestä alkaen testi kesti noin 30 minuuttia. Aine 1 ja vedellä käsitellyt kuntta palat olivat vierekkäin lattialla. Molempien kunttapalojen käsittelemättömän alueen reunalle laitettiin 150 ml sytytysnestettä, joka sytytettiin nestekaasupolttimella. Sytytyksen jälkeen molemmat palot kuitenkin hiipuivat käsittelemättömän alueen alkuosaan noin kahden minuutin jälkeen sytytyksestä (kuva 11). Käsittelemättömiä alueita yritettiin sytyttää nestekaasupolttimella uudelleen neljään kertaan, mutta kunttaa ei saatu kunnolla syttymään. Tämän jälkeen nestekaasupolttimella poltettiin käsittelemättömän alueen ja käsitellyn alueen rajaa molemmilta puolilta. Käsittelemättömät puolet jäivät hetkeksi palamaan. Alue, joka oli käsitelty ennaltaehkäisevällä aineella, ei syttynyt. Vedellä käsitellylle alueelle saatiin pieniä muutaman sekunnin mittaisia liekkejä.



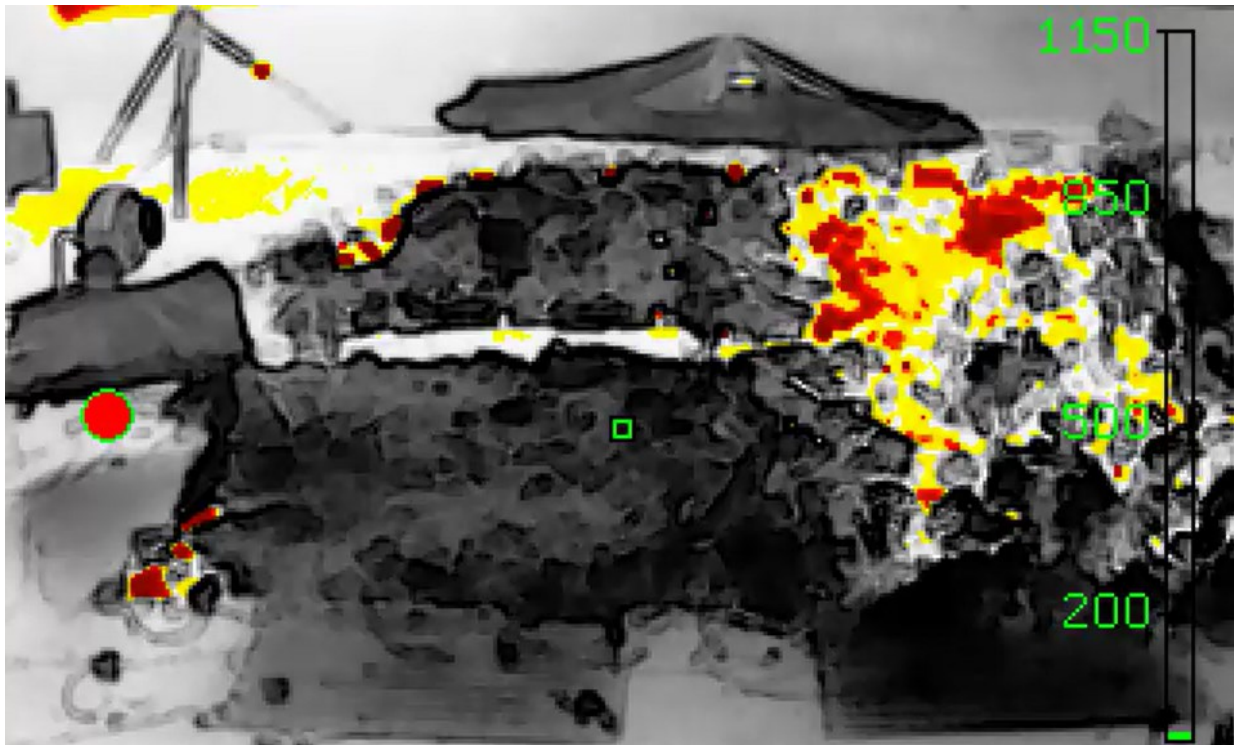
Kuva 11. Palo hiipui noin kahdessa minuutissa sytytyksestä käsittelemättömällä puolella. Etualla ennaltaehkäisevällä aineella käsitelty alue näkyi vaaleana vasemmalla puolella kunttapalaa. Taka-alalla vedellä käsitelty alue puolestaan hieman tummempana vasemmalla puolella.

Ensimmäisen polttokokeen toisessa vaiheessa käsitellyille alueille laitettiin samankokoiset kuivat tuohipalat, jotka sytytettiin nestekaasupolttimella. Tuohipala, joka oli ennaltaehkäisevällä aineella käsitellyllä puolella, oli hankalampi saada syttymään kuin tuohipala vedellä käsitellyllä puolella. Vedellä käsitellyllä puolella tuohipala paloi noin puolitoista minuuttia. Tässä ajassa tuli ei levinnyt kuntaan. Ennaltaehkäisevällä aineella käsitellyllä puolella tuohi paloi kolme minuuttia. Tuohi paloi jostain syystä tällä puolella pidempään, mutta tuli ei levinnyt kuntaan. Tuohien lämpötila lämpökameralla mitattuna oli 500°C tietämillä (kuva 12).

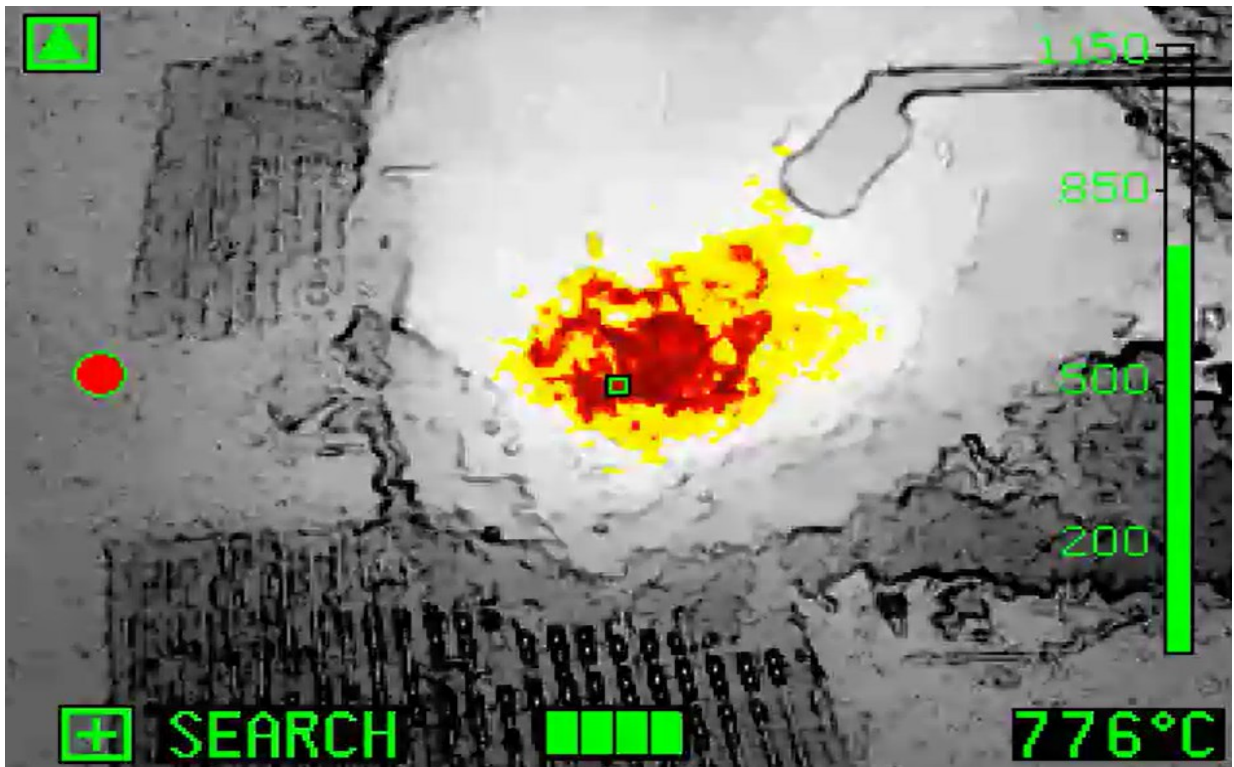


Kuva 12. Palavan tuohen lämpötila lämpökameralla mitattuna oli noin 500°C.

Ensimmäisen polttokokeen lopuksi niin vedellä kuin myös ennaltaehkäisevällä aineella käsiteltyjä alueita yritettiin vielä sytyttää kaasupolttimella tasaisesti koko alueelta. Kumpaakaan aluetta ei saatu syttymään. Vedellä käsitelty alue muodosti vaaleaa savua tai vesihöyryä. Lämpökameralla tarkasteltuna vedellä käsitelty alue jäähdyi nopeammin kuin ennaltaehkäisevällä aineella käsitelty alue (kuva 13). Kun käsiteltyjä alueita poltettiin kaasupolttimella yhdestä kohtaa 10 sekunnin ajan, niin vedellä käsitelty alue hehkui yli 20 sekuntia sekä muodosti vaaleaa savua tai vesihöyryä. Ennaltaehkäisevällä aineella käsitelty alue ainoastaan hehkui heikommin kahdeksan sekuntia lämpökuormituksen jälkeen. Lämpökameralla mitattuna kaasupolttimella saatiin reilu 700°C lämpökuormitus (kuva 14).



Kuva 13. Käsiteltyjä alueita lämpö kuormitettiin tasaisesti nestekaasupolttimella. 30 sekunnin jälkeen käsittelystä etualalla oleva vedellä käsitelty alue jäähdyi nopeammin kuin takana oleva ennaltaehkäisevällä aineella käsitelty alue.



Kuva 14. Kaasupolttimella mitattu lämpötila.

Ensimmäisen päivän toinen koepoltto kesti sytytyksestä alkaen 33 minuuttia. Toiseen testipolttoon koeeasetelmaa muutettiin (kuva 15). Kuntan alle laitettiin kuormalavat, jotta ilmavirta kulkisi paremmin. Kanavapuhaltimien asetukset pysyivät ennallaan. Lisäksi kaikkiin neljään osioon

laitettiin kymmenen kappaletta sytytysnesteeseen kastettuja puuriman pätkiä. Yhden puuriman koko oli 2,5 cm x 5 cm x 23 cm.

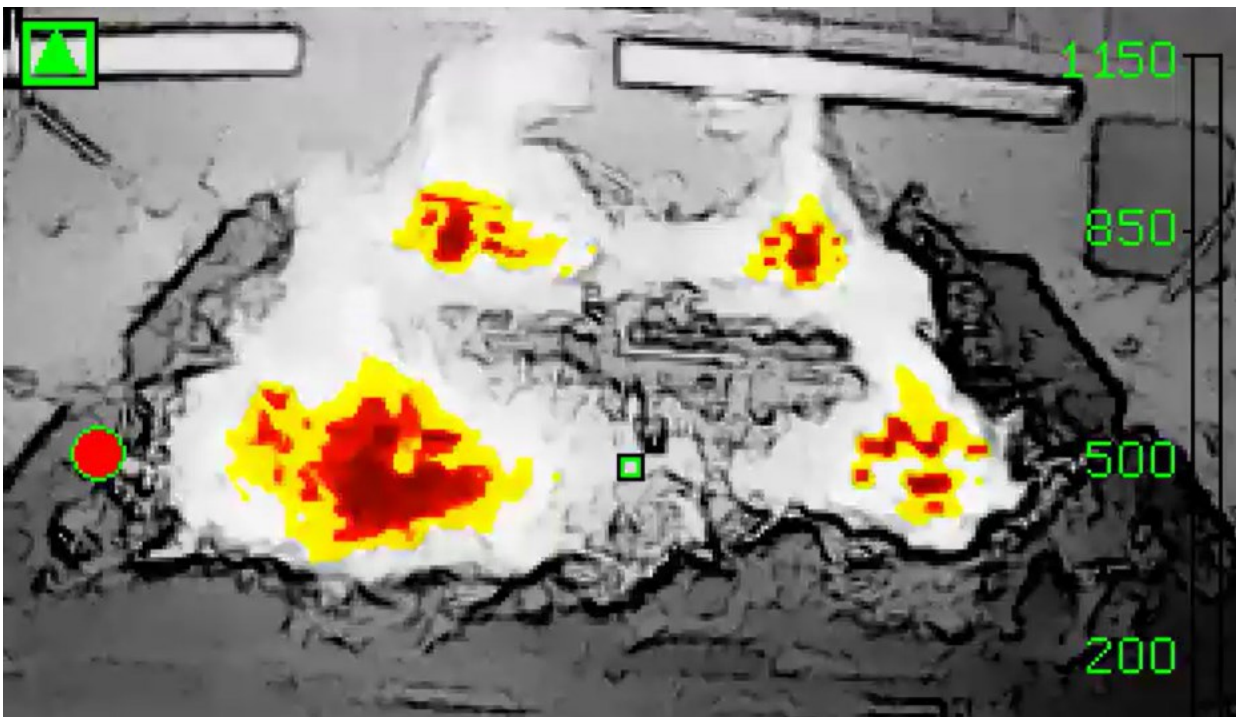


Kuva 15. Toisen testipolton koeasetelma. Etualalla käsittelemättömät alueet. Vasen ylälaita oli käsitelty ennaltaehkäisevällä aineella ja oikea ylälaita vedellä.

Puurimanuotiot syttyivät ongelmitta. Palon voimakkuus alkoi kuitenkin pikkuhiljaa hiipumaan ja jokaiseen nuotioon lisättiin sytytysnestettä noin viiden minuutin palamisen jälkeen. Haluttua palon voimakkuutta ja leviämistä ei saatu vielä kukaan ja kymmenen minuutin kohdalla sytytysnestettä lisättiin jälleen puurimoille. Sytytysnestettä lisättiin kolmannen kerran puurimoille noin 17 minuutin kohdalla. Ennen sytytysnesteen lisäyksiä puurimanuotioiden lämpötila oli lämpökameralla mitattuna reilu 300°C ja kolmannen sytytysnesteen lisäyksen jälkeen lämpötila saatiin nousemaan 800°C:n kieppeille. Sytytysnesteen lisäyksen jälkeen paloa saatiin hieman leviämään käsittelemättömillä alueilla, mutta palo ei edelleenkään selkeästi lähtenyt leviämään. Käsitellyillä alueilla palo ei levinnyt eikä ennaltaehkäisevällä aineella ja vedellä käsitellyillä alueilla havaittu selkeitä eroja (kuva 16). Myös lämpökameran kuvasta saatiin sama havainto. Käsittelemättömillä alueilla lämpimät alueet olivat selkeästi isommat kuin käsitellyillä alueilla, vedellä ja ennaltaehkäisevällä aineella ei havaittu selkeää eroa (kuva 17). Läheltä tarkasteltaessa vedellä käsitellyn kunnan nuotion alapuoli oli kuitenkin hiiltyneen näköinen.



Kuva 16. Vasemmanpuoleisessa kuvassa puurimanuotioihin oli lisätty sytytysnestettä kahteen kertaan. Oikeanpuoleisessa kuvassa sytytysnestettä oli lisätty kolme kertaa. Kuvissa etualalla ennaltaehkäisevällä aineella käsitelty kunttapala ja taka-alalla vedellä käsitelty kuntta, joissa vasemmalla puolella käsitellyt alueet.



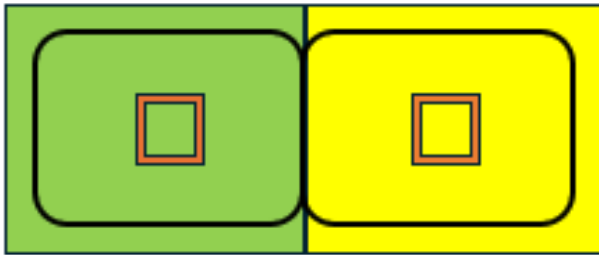
Kuva 17. Sytytysnestettä oli lisätty kolmeen kertaan puurimoille. Vasemmalla puolella käsittelemättömät alueet. Oikealla etualalla vedellä käsitelty ja oikealla takana ennaltaehkäisevällä aineella käsitelty alue.

Toisen polttokokeen loppupuolella sytytysnestettä lisättiin vielä kahdeksikon muodossa koko alueelle (kuva 18). Käsittelemättömillä puolilla palo oli selkeästi voimakkaampaa ja kunnassa ollut varvikko oli palanut lähes kokonaan (kuva 19). Vedellä käsitellyllä alueella palo levisi hieman ja sytytysnesteen kohdalla kuntta oli hiiltynyt ja palojälki oli selkeästi nähtävissä. Ennaltaehkäisevällä alueella kunnassa ei näkynyt palamisen jälkiä. Sytytysnesteen palamisen jälkeen varvikko oli edelleen hyvässä kunnossa ja ennaltaehkäisevän aineen vaalea sävy oli myös säilynyt.

Käsitelty alue

Sytytettävä alue

Kanava-  
puhallin



Kuva 18. Sytytysnestettä lisättiin sekä vedellä että ennaltaehkäisevällä aineella käsitellyille alueille kahdeksikon muodossa. Alueiden keskellä puurimanuotiot.



Kuva 19. Sytytysnestettä oli lisätty molempiin testattaviin kunnappaloihin kahdeksikon muodossa. Ylhäällä vasemmanpuoleinen kuva oli otettu juuri sytytysnesteen lisäyksen jälkeen ja oikeanpuoleinen minuutin kuluttua. Alhaalla oleva kuva oli otettu, kun sytytysnesteen lisäyksestä oli kulunut kolme minuuttia. Kuvissa etualalla ennaltaehkäisevällä aineella käsitelty kunnappala ja taka-alalla vedellä käsitelty. Kunnappaloissa vasemmat puolet käsiteltyjä ja oikeat puolet käsittelemättömiä.

Toisen polttokokeen lopuksi puurimanuotiot vielä levitettiin tasaisesti testattaville kunnalle neliöille. Ennaltaehkäisevällä aineella käsitellyllä osalla liekit hiipuivat minuutin kuluessa, kun taas vedellä käsitellyllä puolella puurimat vielä paloivat liekillä. Myös käsittelemättömillä alueilla puut paloivat vielä liekillä (kuva 20).



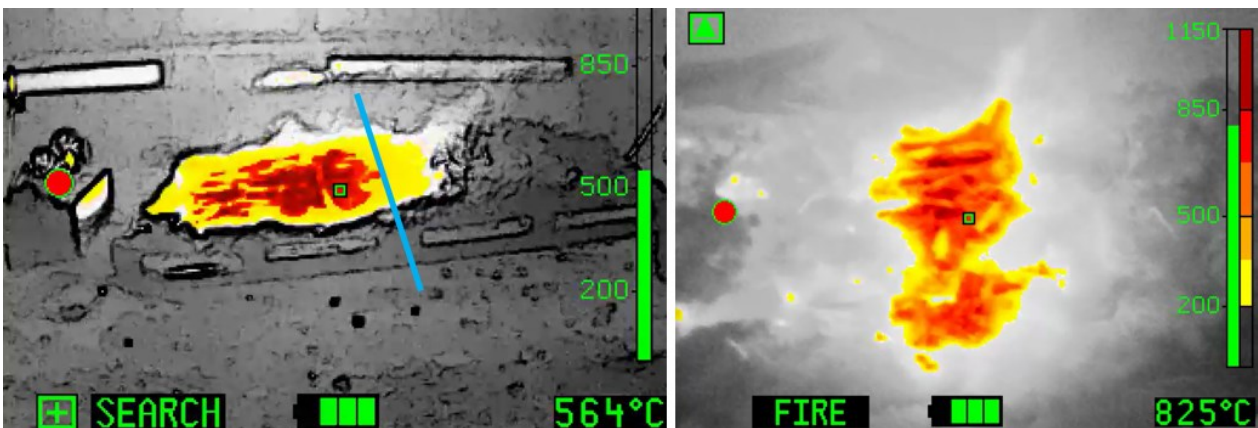
Kuva 20. Puurimanuotiot levitettynä. Etualalla vasemmalla puolella vedellä käsitelty alue ja oikealla ennaltaehkäisevällä aineella käsitelty alue. Taka-alalla käsittelemättömät alueet.

Ensimmäisen päivän kolmannessa polttokokeessa testattiin ainoastaan ennaltaehkäisevää ainetta 1. Myös koeasetelmaa muutettiin oleellisesti. Testattava kunta oli edelleen kuormalavan päällä, mutta kuormalavan toinen pääty nostettiin 23 cm korkeammalle. Testattavalle alueelle saatiin siis 5,5 asteen nousu. Myös tuulen voimakkuutta lisättiin laittamalla molemmat kanavapuhaltimet puhaltamaan testattavaan alueeseen päin ja niitä nostettiin noin 30 cm. Ilmavirran nopeus oli 10 cm päässä kanavapuhaltimesta 17 m/s luokkaa ja 50 cm päässä 4–5 m/s. Myös palon voimakkuutta haluttiin suuremmaksi. Käsittelemättömälle puolelle laitettiin 22 puurimaa. Lisäksi koko käsittelemättömälle alueelle laitettiin kastelukannulla kolme litraa sytytysnestettä. Koe kesti sytytyksestä alkaen 28 minuuttia.

Palo saatiin syttymään heti voimakkaasti. Suuremman ilmavirran ja nousun vuoksi palo yritti selkeästi edetä ennaltaehkäisevällä aineella käsitellylle alueelle (kuva 21). Lämpökameran tallenteesta tarkastellessa käsitellyn alueen rajalla lämpörasitus oli pääsääntöisesti 200–500°C. Korkeimmillaan lämpötila oli yli 800°C (kuva 22). Lämpötila-antureiden mukaan käsitellyn ja käsittelemättömän kunnan rajalla lämpötila oli noin kahdeksan minuutin ajan 800°C tasolla. Samaan aikaan käsitellyllä puolella olevan anturin lämpötila oli 50°C tasolla. Palo ei kuitenkaan levinnyt käsitellylle alueelle. Käsittelemättömän ja käsitellyn alueen raja oli selkeästi havaittavissa. Käsitellyllä alueella ei havaittu muutoksia kunnassa (kuva 23).



Kuva 21. Ensimmäisen päivän kolmatta polttokoetta oli mennyt 7 minuuttia. Palo selkeästi yritti edetä käsitellylle alueelle päin. Käsitelty alue vasemmalla.



Kuva 22. Lämpökameralla lämpötiloja ensimmäisen päivän kolmannesta polttokokeesta. Sininen viiva käsitellyn ja käsittelemättömän alueen raja. Oikealla puolella ennaltaehkäisevällä aineella käsitelty alue.



Kuva 23. Ensimmäisen päivän kolmas polttokoe ennen rimojen siirtämistä. Käsitelty alue oikealla.

Kun testiä oli kulunut 12 minuuttia, palon intensiteetti alkoi hiipumaan palavan aineksen vähehtessä. Puurimat siirrettiin lapiolla käsitellyn alueen rajalle. Käsiteltyä aluetta ei edelleenkään saatu syttymään. Käsitellyltä alueelta ei myöskään noussut savua tai vesihöyryä. 16 minuutin kohdalla palavan hiiloksen ja käsitellyn alueen väliin laitettiin kuivaa käsittelemätöntä kunttaa. Kuntta saatiin laiskasti osittain syttymään. Lisäksi käsittelemätön kunta muodosti vaaleaa savua tai vesihöyryä.

Ylimääräisenä testinä ennaltaehkäisevällä aine 1:llä käsiteltyä ja osin poltettua kunttaa jätettiin vielä seuraavalle testipäivälle. Kunttaa yritettiin saada kaasupolttimella kuumentamalla syttymään useaan kertaan polttamalla kunttaa pistemäisesti pisimmillään noin 20 sekuntia. Kunttaa ei saatu syttymään eikä edes savuamaan. Verrokkina samaa kokeiltiin käsittelemättömälle kunnalle, joka saatiin syttymään ja muodostamaan reilusti vaaleaa savua sekä vesihöyryä.

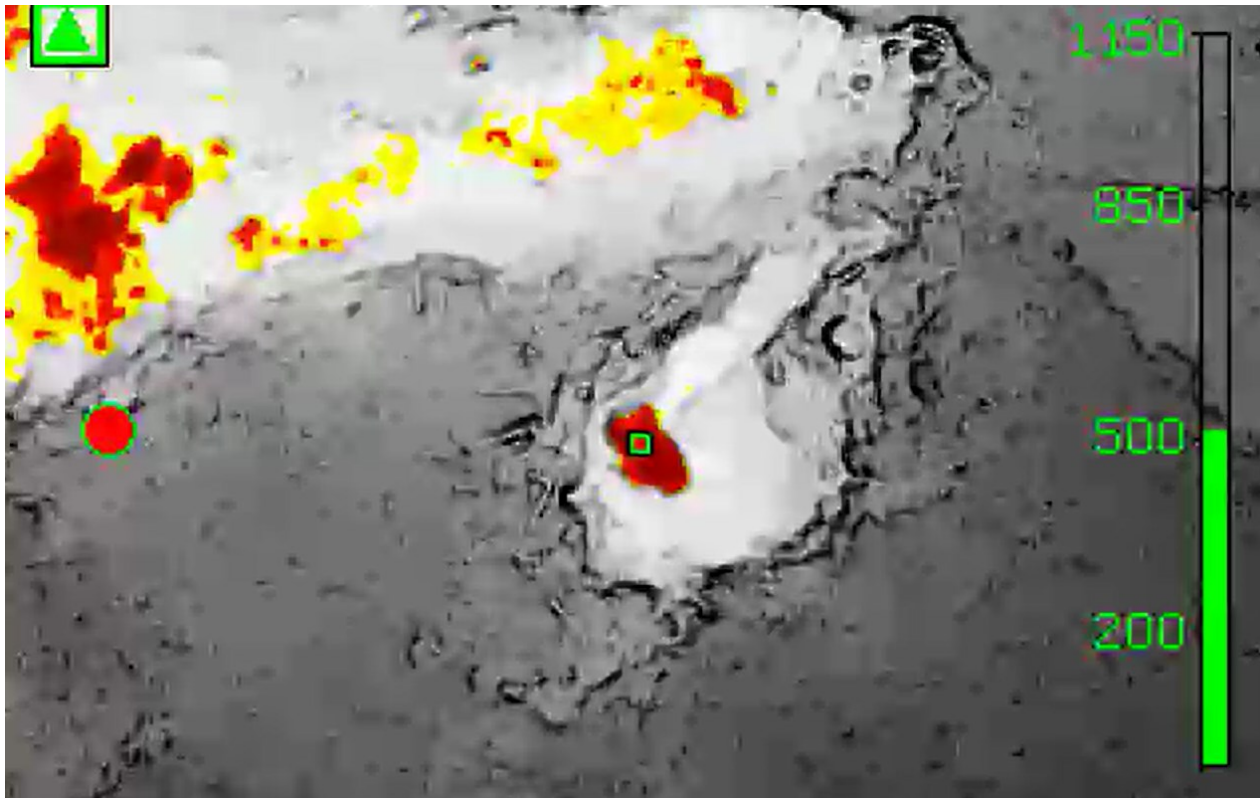
#### 4.2.3 Toinen polttokoepäivä

Toisen testipäivänä polttokokeissa oli testattavana aine 2. Lisäksi kahdessa ensimmäisessä koepoltossa oli verrokkina vesi. Koeasetelmat pyrittiin pitämään mahdollisimman samanlaisena kuin ensimmäisenä päivänä. Ensimmäinen koepoltto kesti sytyksestä alkaen 21 minuuttia. Kuten ensimmäisenä päivänä tässäkin testissä palo syttyi alkuun hyvin, mutta hiipui käsittelemättömän alueen alkureunaan parissa minuutissa (kuva 24). Käsittelemättömiä alueita yritettiin sytyttää kaasupolttimella kahteen kertaan, minkä jälkeen käsittelemättömille alueille sekä alueiden rajalle lisättiin sytytysnestettä. Palo kuitenkin hiipui, kun sytytysneste oli palanut. Palo ei levinnyt ennaltaehkäisevällä aineella käsitellyllä puolella eikä myöskään vedellä käsitellyllä alueella.



Kuva 24. Toisenakin päivänä ensimmäisen polttokokeen palo hiipui parissa minuutissa käsittelemättömien alueiden alkuun. Etualalla ennaltaehkäisevällä aineella käsitelty alue näkyi tummana alueena vasemmalla puolella kunttapalaa. Taka-alalla vedellä käsitelty alue näkyy myös vasemmalla puolella tummana alueena.

Tuohitestissä vedellä käsitellyllä puolella oleva tuohi paloi noin kahden minuutin ajan. Tässä ajassa palo ei levinnyt ympäröivään kunttaan. Ennaltaehkäisevällä aineella käsitellyllä puolella tuohi paloi kolmen minuutin ajan ja tuli ei levinnyt kunttaan. Lämpökameralla mitattuna tuohien lämpötilat olivat 500°C tietämillä kuten edellisessäkin testissä (kuva 25).

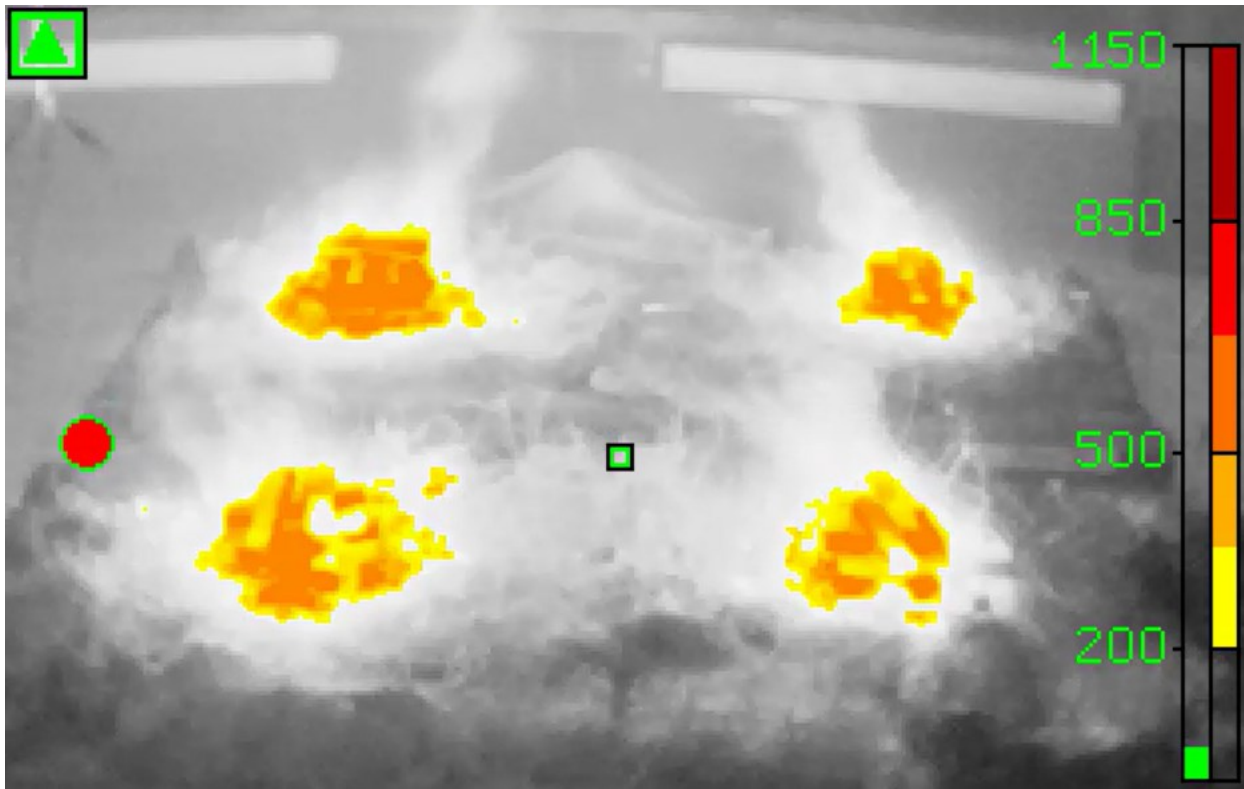


Kuva 25. Palavan tuohen lämpötila lämpökameralla mitattuna oli toisenakin testipäivänä noin 500°C.

Toisen testipäivän toinen koepolttokoe kesti sytytyksestä alkaen 21 minuuttia. Jälleen puurimat sytyivät ongelmitta, mutta palon voimakkuus alkoi hiipumaan. Sytytysnestettä lisäti puurimoille kolmeen kertaan kahden, viiden ja seitsemän minuutin jälkeen sytytyksestä. Käsittelemättömillä alueilla paloa saatiin leviämään paremmin kuin ensimmäisenä päivänä (kuva 26). Myös käsitellyillä alueilla paloa saatiin hieman leviämään ympäröivään kuntaan ja nuotioiden alla kunta oli hiiltyneen näköinen. Vedellä ja ennaltaehkäisevällä aineella ei havaittu selkeitä eroja. Lämpökameralla tarkasteltuna käsittelemättömien puolien lämpöiset alueet olivat jonkin verran suurempia kuin käsiteltyjen alueiden. Vedellä ja ennaltaehkäisevällä aineella käsiteltyjen puolien välillä ei havaittu selkeitä eroja (kuva 27).



Kuva 26. Toisen testipäivän toinen polttokoe. Vasemmassa kuvassa sytytysnestettä oli lisätty kahteen kertaan ja oikeanpuoleisessa kuvassa kolme kertaa. Kuvissa etualalla ennaltaehkäisevällä aineella käsitelty kunttapala ja taka-alalla vedellä käsitelty kunta, joissa vasemmalla puolella ovat käsitellyt alueet.



Kuva 27. Sytytysnestettä oli lisätty puurimoille kolmeen kertaan toisena testipäivänä. Vasemmalla puolella ovat käsittelemättömät alueet. Oikealla etualalla on vedellä käsitelty alue ja oikealla taka-alalla ennaltaehkäisevän aineen alue.

Toisen polttokokeen loppupuolella sytytysnestettä lisättiin kuntiin kahdeksikon muodossa. Molemmat kunnat syttyivät voimakkaasti (kuva 28). Käsittelemättömien ja käsiteltyjen alueiden välillä ei havaittu selkeitä eroja. Jokaisessa neljässä osiossa kunnassa oleva varvikko oli lähes kokonaan palanut. Lopuksi puurimat vielä levitettiin tasaisesti jokaiseen neliöön. Minuutin kuluttua levityksestä jokaisella alueella näkyi vielä liekkejä, vedellä käsitellyllä alueella voimakkaammin kuin muilla. Noin viiden minuutin kuluttua levityksestä vedellä käsitellyllä alueella oli vielä selkeästi liekkejä näkyvissä, kun taas ennaltaehkäisevän aineen puolella sekä käsittelemättömien alueiden puolella liekit olivat lähes kokonaan hiipuneet (kuva 29).



Kuva 32. Sytytysnestettä oli lisätty molempiin testattaviin kunttapaloihin kahdeksikon muodossa. Ylhäällä vasemmanpuoleinen kuva oli otettu juuri sytytysnesteen lisäyksen jälkeen ja oikeanpuoleinen minuutin kuluttua. Alhaalla oleva kuva oli otettu, kun sytytysnesteen lisäyksestä oli kulunut kolme minuuttia. Kuvissa on etualalla ennaltaehkäisevällä aineella käsitelty kunttapala ja taka-alalla vedellä käsitelty. Kunttapaloissa vasemmat puolet ovat käsiteltyjä ja oikeat puolet käsittelemättömiä.



Kuva 29. Toisen testipäivän toisen koepolton loppuvaiheessa puurimat levitettiin tasaisesti. Etualalla vasemmalla puolella on vedellä käsitelty alue ja oikealla ennaltaehkäisevällä aineella. Taka-alalla ovat käsittelemättömät alueet.

Toisen päivän kolmannessa polttokokeessa oli testissä vain ennaltaehkäisevä aine 2. Koeasetelma muutettiin samanlaiseksi kuin ensimmäisen päivän kolmannessa poltossa. Polttokoe kesti sytytyksestä alkaen noin 20 minuuttia.

Myös tässä testissä palo syttyi heti voimakkaasti ja yritti edetä ennaltaehkäisevällä aineella käsitellylle puolelle (kuva 30). Lämpökameralla lämpötila käsitellyn alueenrajalla oli 200–600°C (kuva 31). Lämpötila-antureiden mukaan käsittelemättömän ja käsitellyn kunnan rajalla lämpötilan oli noin kuuden minuutin ajan 800°C tasolla. Samaan aikaa käsitellyllä puolella olevan anturin lämpötila oli 350°C tasolla. Palo tarttui käsitellyllä puolella rajan seudussa oleviin yksittäisiin varpuihin. Varvut paloivat sekuntien ajan pienellä liekillä, minkä jälkeen ne sammuiivat. Noin 10 cm matkalta sammalikko oli hiiltyneen näköinen, mutta selkeää leviämistä käsitellylle puolelle ei kuitenkaan tapahtunut (kuva 32).



Kuva 30. Toisen päivän kolmas polttokoe. Ylhäällä on kuva juuri sytytyksen jälkeen ja alhaalla noin 7 minuutin kuluttua. Käsitellyt alueet ovat vasemmalla puolella.



Kuva 31. Lämpökameralla kuva toisen testipäivän kolmannesta polttokokeesta. Käsitelty alue on oikealla puolella.



Kuva 32. Toisen päivän kolmas polttokoe ennen kuin rimat siirrettiin käsitellyn alueen rajalle. Käsitelty alue on oikealla.

Puurimat siirrettiin käsitellyn alueen rajalle, kun sytytyksestä oli kulunut aikaa noin 7 minuuttia. Paloa ei saatu selkeästi leviämään käsitellylle alueelle. Kun puurimojen ja käsitellyn alueen rajalle ja puurimojen päälle laitettiin kuivaa käsittelemätöntä kunttaa, kunta syttyi palamaan. Lisäksi muodostui vaaleaa savua tai vesihöyryä. Lopuksi käsiteltyä kunttaa nostettiin palavan kunnan ja rimojen päälle. Selkeää syttymistä ei havaittu.

## 4.3 Päätelmät

Kahta maastopaloissa käytettävää ennaltaehkäisevää aineetta testattiin kahtena päivänä kuudessa polttokokeessa Pelastusopiston paloteatterin polttotilassa. Molempina päivinä tehtiin kolme samankaltaista polttokoea kummallekin testissä olleelle aineelle. Missään polttokokeessa paloa ei saatu leviämään ennaltaehkäisevällä aineella käsitellylle puolelle.

Tuohitestissä ei saatu paloa leviämään kummassakaan ennaltaehkäisevällä aineella käsitellyssä kuntassa, mutta ei myöskään vedellä käsitellyllä puolella. Valmistelupäivänä testattiin, leviääkö palo käsittelemättömään kuntaan palavasta tuohesta. Palo levisi muutamassa minuutissa ympäröivään kuntaan. Huomioitavaa kuitenkin on, että valmistelupäivän testi tehtiin ulkona ja polttokokeet sisätiloissa. Yllättävää oli, että molempina päivinä ennaltaehkäisevillä aineilla käsitellyillä puolilla tuohet paloivat noin minuutin verran pidempään kuin vedellä käsitellyillä puolilla. Toisaalta kahdella toistolla tämä voi olla vain sattumaa.

Molempina päivinä ensimmäisessä ja toisessa polttokokeessa oli mukana verrokina vesi. Testeissä ei saatu selkeitä eroja ennaltaehkäisevän aineen ja veden välillä. Paloa ei saatu selkeästi leviämään käsitellylle alueelle, oli se sitten käsitelty vedellä tai ennaltaehkäisevällä aineella. Toisaalta molempina päivinä ensimmäisessä ja toisessa testissä oli hankaluutta saada syttymään käsittelemätöntäkin kunta-aluetta. Palon intensiteetti oli laboratorio-olosuhteissa huomattavasti pienempi kuin oikeassa maastopalotilanteessa, mikä varmasti myös vaikuttaa tuloksiin. Polttokokeet suoritettiin sisätiloissa, mutta niissä huomioitiin riittävä hapen saanti.

Ensimmäisenä testipäivänä ennaltaehkäisevällä aineella sekä vedellä käsiteltyjä alueita lämpö rasiettiin tasaisesti kaasupolttimella. Vedellä käsitelty alue muodosti huomattavasti höyryä tai vaaleaa savua ja jäähdyi nopeammin kuin ennaltaehkäisevällä aineella käsitelty alue. Harmillisesti tämä testi jäi toisena päivänä tekemättä toisella ennaltaehkäisevällä aineella.

Puurimanuotiotestissä palo levisi käsittelemättömillä alueilla molempina päivinä. Selkeitä eroja kuitenkaan ennaltaehkäisevän aineen ja veden välillä ei havaittu. Ensimmäisenä päivänä ennaltaehkäisevän aineen alueella nuotion alapuolella olevassa kuntassa ei ollut juurikaan muutoksia. Vedellä käsitellyllä puolella kunta puolestaan oli hiiltyneen näköinen. Toisena päivänä sekä vedellä käsitelty että ennaltaehkäisevällä aineella käsitellyllä puolella palo hieman levisi ympäröivään kuntaan, selkeästi kuitenkin vähemmän kuin käsittelemättömällä puolella. Toisena päivänä palot saatiin kaiken kaikkiaan paremmin syttymään ja palamaan kuin ensimmäisenä päivänä.

Kun puurimanuotiot levitettiin tasaisesti käsitellyille alueille, ensimmäisenä päivänä ennaltaehkäisevän aineen puolella palo hiipui nopeammin kuin vedellä käsitellyllä puolella. Toisena päivänä ei saatu selkeitä eroja tässä.

Kolmannessa polttokokeessa oli testissä vain ennaltaehkäisevät aineet. Molemmissa testeissä palot saatiin syttymään voimakkaasti ja etenemään selkeästi käsitellyille puolille. Palot eivät kuitenkaan levinneet käsitellyille alueille. Ensimmäisenä päivänä varvikko oli jopa koskemattoman näköinen.

Ennaltaehkäisevien aineiden vertailu keskenään ei mielestäni ole asianmukaista näiden testien puitteissa. Vaikka koeasetelmat pyrittiin pitämään molempina päivinä samanlaisina, pienten eroavaisuuksien vuoksi ne eivät ole aivan vertailukelpoisia. Ensimmäisenä päivänä kaikki koe-poltot kestivät jonkin verran pidempään kuin toisena päivänä. Lisäksi kuntan kosteusprosentti oli

todennäköisesti toisena testipäivänä pienempi kuin ensimmäisenä, koska kunnat olivat vuorokauden pidempään huoneen lämmössä. On tärkeää myös huomioida, että kunnat ei ollut täysin tasalaatuisia. Tämä voi vaikuttaa veden ja ennaltaehkäisevän aineen vertailutuloksiin, erityisesti näin pienillä tai hieman muuttuvilla testien toistomäärillä. Huomioitavaa on myös, että toinen testattavista ennaltaehkäisevistä aineista on markkinoilla oleva tuote ja toinen ei.

## 5 Ennaltaehkäisevien aineiden käyttö Suomessa

Suomessa paloa ennaltaehkäisevien aineiden käyttö maastopaloissa on ollut varsin vähäistä. Kirjoitettua tietoa löytyy lähinnä testausraporteista ja niitäkin löytyi vain muutamia parista eri aiheesta.

Eräs käytössä oleva valmiste on käyttövalmis tuote, joka ei edellytä erillistä sekoittamista veteen. Tuotteessa on luonnonmukaisia sakeuttavia ainesosia, joiden tarkoituksena on lisätä nesteen viskositeettia ja parantaa sen tarttuvuutta kasvillisuuteen. Näin aine pysyy paremmin kasvustossa ja ei valu helposti alempiin maakerroksiin, mikä tehostaa sen sammutusvaikutusta. Pelastusopiston testikäytössä valmisteeseen oli lisätty elintarvikekäyttöön soveltuva väriaine visuaalisen havaittavuuden parantamiseksi maastoon levitettäessä. Kuivuttuaan aine vaalenee ja erottuu selkeästi ympäristöstään. Toinen käytössä oleva valmiste sekoitetaan sammutusveteen 1 % suhteessa, ja se soveltuu käytettäväksi myös pelastuslaitosten kalustossa kuten paineenkestävissä pumppujärjestelmissä. Kyseistä valmistetta on hyödynnetty kansainvälisesti suurpalotilanteissa, ja sen on havaittu parantavan sammutustehokkuutta sekä edistävän turvallisempaa työympäristöä vähentämällä savunmuodostusta jälkisammutuksen aikana. Valmistajan mukaan aine voi joutuessaan kosketuksiin palon kanssa vapauttaa pieniä määriä ammoniakkia ilmaan. (Laitinen ym. 2022, 11.)

Metsähallitus on kokeillut metsäpalon torjunta-ainetta kulotuksen yhteydessä pienelle, noin 10 neliömetrin alueelle. Testialue oli niin pieni, että tuli meni siitä yli. Ennaltaehkäisevällä aineella käsitelty alue jäi kuitenkin palamatta. (Ziemann 2018.)

Pelastusopiston talvella tehdyissä ennaltaehkäisevän aineen polttokokeissa todettiin testattava aine toimivaksi kunnan palamisen rajoittamisessa ja palorintaman katkaisussa. Neljässä eri polttokokeessa sekä esitestauksessa palo pysähtyi ennaltaehkäisevällä aineella käsitellyn alueen reunaan. (Toivanen 2022a.)

Pelastusopisto on testannut ennaltaehkäisevää ainetta myös luonnollisissa maasto- ja metsäolosuhteissa kulotuksen yhteydessä kolmena päivänä. Kaikissa testeissä ennaltaehkäiseväaine todettiin toimivaksi ja tehokkaaksi maastopalojen rajoittamisessa. Pääsääntöisesti kahden metrin levyinen rajoituslinja oli riittävä, mutta kovemmassa tuulenpuuskassa joitakin heitteitä meni käsittelemättömälle puolelle. (Toivanen 2022b.)

Eri testeissä ennaltaehkäiseviä aineita on levitetty muun muassa käsiammuttimella, maatilatraktorin perään kytketyllä lietelannanlevitysvaunulla, pelastustoimen käyttämillä 42 mm työjohdoilla, metsäkonesammutussäiliön avulla sekä säiliön perään asennetuilla rei'itetyillä teräsputkilla, joista aine valui omalla painollaan. Haasteita ilmeni optimaalisen ainemäärän levityksessä sekä aineen viskositeetin kanssa olemassa olevalla pumppukalustolla. (Toivanen 2022a; Toivanen 2022b; Mänttari 2022, 33; Hyttinen 2020, 23–24.)

Kalajoen metsäpalossa kokeiltiin veteen sekoitettavaa ennaltaehkäisevää ainetta Etelä-Savon pelastuslaitoksen Mörkö-yksiköllä, joka pystyi tekemään noin 100 metrin palokatkon kerralla. Palonestoaineella käsitelty alue ei syttynyt uudestaan palamaan. (Mänttari 2022, 35.)

Suomessa toimii joitakin kotimaisia maastopaloa ennaltaehkäisevien aineiden tuottajia ja aineiden valmistus tapahtuu kotimaassa. Tämä mahdollistaa tarvittaessa nopean käyttöönoton ja

lisätuotantokin voidaan käynnistää nopeasti. Logistiset ratkaisut olisivat todennäköisesti järjestävissä joustavasti kotimaan sisällä. Ennaltaehkäisevien aineiden tuotanto voidaan tarvittaessa käynnistää ympärivuorokautiseksi, joten suurtenkin ainemäärien valmistus ja toimitus todennäköisesti onnistuisi lyhyelläkin aikataululla.

## 6 Pohdinta

Tässä opinnäytetyössä tarkasteltiin maastopaloihin liittyviä ilmiöitä sekä niissä käytettäviä kemiallisia aineita, erityisesti palon ennaltaehkäisyyn tarkoitettuja rajoitusaineita. Pääpaino oli laboratorio-olosuhteissa tehdyissä polttokokeissa, joissa testattiin kahden eri rajoitusaineen toimivuutta ja tehokkuutta maastopalon rajoittamisessa. Näiden tulosten perusteella veden ja kemiallisten aineiden välillä ei havaittu selkeitä tai yksiselitteisiä eroja. Tämä johtunee ensisijaisesti koeasetelman rajoituksista: käsittelemätön kunta ei syttynyt kunnolla, palo ei edennyt suunnitellulla tavalla ja koeasetelmaa jouduttiin muuttamaan testien edetessä.

Kolmannessa polttokokeessa testatut aineet kuitenkin osoittivat selkeää tehokkuuttaan. Erityisesti ensimmäisen päivän polttokoe osoitti, että ennaltaehkäisevä rajoitusaine toimii tehokkaasti palon etenemisen pysäyttämässä. Rajoitusaineella käsitelty kunta säilyi ulkoisesti vahingoittumattoman näköisenä, vaikka se altistui voimakkaalle lämpörasitukselle. Lisäksi aiemmin tehdyt testit tukevat tätä.

Polttokokeiden luotettavuutta heikensi muun muassa kuntan kosteus. Kolmas polttokoe oli intensiteetiltään onnistunein, mutta siinä ei ollut vesikäsiteltyä vertailukuntaa mukana. Nämä tulokset olisi ollut mielenkiintoista nähdä. Kanavapuhaltimen tilalle myös mietittiin savutuuletinta, mutta sen arvioitiin olevan liian tehokas pieneen testitilaan. Jälkiviisaana olisi ollut hyödyllistä käytännössä testata, olisiko palo saatu leviämään sen avulla paremmin vai olisi savutuuletin sammuttanut palon. Testattavaa kuntaa oli rajallinen määrä, joten sitä käytettiin säästeliäästi.

Tällä hetkellä suuret maastopalot eivät muodosta Suomessa toistuvaa tai merkittävää vuosittaista uhkaa. Useat tutkimukset ja asiantuntija-arviot kuitenkin ennustavat, että ilmastomuutoksen seurauksena maastopalojen todennäköisyys ja vakavuus kasvavat tulevaisuudessa. Laajoista maastopaloista aiheutuu pelastuslaitoksille huomattavia kustannuksia, joista valtaosa koostuu henkilöstömenoista. Tämä kävi selvästi ilmi esimerkiksi Kalajoen maastopalon yhteydessä. Tulevaisuuden haasteita lisäävät myös pelastajapula, sopimuspalokuntien saatavuuden heikkeneminen, pelastushenkilöstön ikääntymiseen liittyvät työkykykysymykset sekä hyvinvointialueiden kiristyvä taloudellinen tilanne. Kemiallisten rajoitusaineiden käyttö voisi olla perusteltua erityisesti suurissa maastopaloissa, joissa palon leviäminen on ennakoitavissa ja riski merkittäväle leviämiselle on suuri. Ennaltaehkäisevien aineiden käyttö voisi tietyissä tilanteissa vähentää sammutustyön kustannuksia sekä tukea henkilöstön toimintakykyä ja työterveyttä pitkällä aikavälillä.

Jotta kemialliset rajoitusaineet voitaisiin ottaa tehokkaasti osaksi maastopalojen torjuntaa, pelastuslaitoksilta vaaditaan tarkempia selvityksiä ja konkreettisia laskelmia siitä, missä tilanteissa niiden käyttö on operatiivisesti ja taloudellisesti perusteltua. Lisäksi on tärkeää selvittää, millaisella kalustolla aineita voidaan levittää tehokkaasti ja kuinka logistiikka saadaan toimimaan eri tilanteissa. Laajamittainen varastointi pelastuslaitoksilla ei todennäköisesti olisi järkevää tai kustannustehokasta muun muassa aineiden säilyvyyden kannalta. Olisi myös kannattavaa miettiä, tulisiko rajoitusaineiden käyttö keskittää esimerkiksi tietylle pelastuslaitokselle tai esimerkiksi maastopalomuodostelmalle (G-FFFV), jolla olisi myös erityiskalustoa aineiden levittämiseen sekä kokemusta ja osaamista myös kansainvälisistä toimintamalleista. Olisi tärkeää myös pohtia Pohjoismaiden välistä yhteistyötä ja varautumista, jotta esimerkiksi aineiden levittäminen lentokoneiden avulla olisi mahdollista.

Mahdollisia jatkotutkimusaiheita voisi olla, kuinka laajalti pelastuslaitoksilla tunnetaan näiden aineiden käyttömahdollisuudet ja onko niiden hyödyntämistä jo harkittu tai pilotoitu eri alueilla. Myös tarkemmat kustannuslaskelmat siitä, millaisissa tilanteissa kemiallisten rajoitusaineiden käyttö olisi taloudellisesti kannattavaa ja operatiivisesti perusteltua, voisi olla kiinnostava aihe. Lisäksi käytännön toteutukseen liittyvät tekijät vaatisivat lisäselvityksiä. Esimerkiksi tulisi tutkia, millaisella kalustolla aineita olisi tehokkainta levittää, jotta ne saadaan optimaalisesti oikealle alueelle riittävässä määrin. Olisi myös hyödyllistä arvioida, kuinka laajan rajoituslinjan voi käytännössä rakentaa tietyn ajan, henkilöstömäärän ja kaluston puitteissa.

Opinnäytetyöprosessi oli kokonaisuudessaan mielenkiintoinen ja antoisa. Oli ainutkertainen mahdollisuus päästä testaamaan maastopaloissa käytettäviä rajoitusaineita käytännössä. Oman aikataulun hallinnassa olisi ollut parantamisen varaa. Kirjoitusprosessia olisi ollut syytä jakaa tasaisemmin. Teoreettisen tiedon etsimen suomen kielellä oli haastavaa. Ulkomaalaisia lähteitä löytyi runsaastikin, mutta se vaati käännöstyötä sekä huolellista lähdekriittistä arviointia.

## Lähteet

Blunt, R., Bailey, D. & Rodgers, L. 2019. Arctic wildfires: How bad are they and what caused them? BBC. <https://www.bbc.com/news/world-europe-49125391>. 3.4.2025.

Dong, C., Changxin Dong, I. d'Aquino, A., Sen, S., Hall, I. A., Yu, A. C., Crane, G. B., Acosta, J. D. & Appel, E. A. 2024. Water-Enhancing Gels Exhibiting Heat-Activated Formation of Silica Aerogels for Protection of Critical Infrastructure During Catastrophic Wildfire. [www-dokumentti](http://www-dokumentti.com). <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.202407375>. 9.4.2025.

ECHA European chemicals agency. REACH-asetus tutuksi. <https://echa.europa.eu/fi/regulations/reach/understanding-reach>. 4.4.2025.

Fernandez-Anez, N. & Węgrzyński, W. 2024. Getting ready for the wildfires in Northern Europe with Nieves Fernandez-Anez. Fire science show -podcast. 3.1.2025.

Finney, M. A., McAllister, S.S., Grumstrup, T. P. & Forthofer, J. M. 2021. Wildland Fire Behaviour. Dynamics, principles and processes. CSIRO. Australia.

Goldberg, E. 2022. Industry standard. Understanding the chemistry of fire retardants. International Association of Wildland Fire. <https://www.iawfonline.org/article/industry-standard-understanding-the-science-of-chemical-retardants/>. 11.12.2024.

Hillberg, A. 2020. Maastopalot ja palon leviämisen dynamiikka. Opinnäytetyö. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/345519/Antti\\_Hillberg\\_Opinn%c3%a4ytety%c3%b6.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/345519/Antti_Hillberg_Opinn%c3%a4ytety%c3%b6.pdf?sequence=2&isAllowed=y). 11.12.2024.

Holopainen, H. 2021. Kalajoen maastopalon kustannukset nousevat yli kahteen miljoonaan euroon – kunnille tulossa lisälasku. [https://yle.fi/a/3-12185014?utm\\_source=chatgpt.com](https://yle.fi/a/3-12185014?utm_source=chatgpt.com). 10.4.2025.

Hyttinen, H. 2020. Sammutussäiliön käyttö metsäpaloissa. Opinnäytetyö. Pelastusopisto. Kuopio. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/348101/Hyttinen\\_Heli.pdf?sequence=4&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/348101/Hyttinen_Heli.pdf?sequence=4&isAllowed=y). 11.12.2024.

Hyttinen, V., Tolonen, P. & Väisänen, T. 2018. Palofysiikka. SPEK. Helsinki.

Kosunen, A.-M. 2020. Metsä- ja maastopalot. Moodle-materiaali. Pelastusopisto. Kuopio.

Kukkonen, M. 2021. Metsäsektorin ja pelastusalan käsityksiä metsäpaloista. [www-dokumentti](http://www-dokumentti.com). [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/495136/B\\_6\\_2021\\_Metsasektorin\\_ja\\_pelastusalan\\_kasityksia\\_metsapaloista.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/495136/B_6_2021_Metsasektorin_ja_pelastusalan_kasityksia_metsapaloista.pdf?sequence=1). 24.11.2024.

Köngäs, P. 2020. Yleistyvät metsäpalot vaativat uusia sammutuskeinoja – suomalaisten keksinnöt voisivat auttaa myös maailmalla. Yle. <https://yle.fi/a/3-11436927>. 11.12.2024.

Laitinen, J., Hassinen, M., Kiviranta, K., Toivanen, P., Huttu, I., Savola, R., Ahonen, V., Ruusunen, J., Rissanen, S. & Uusitalo, A. 2022. Pelastajan työvälineet ja henkilökohtaiset suojaimet metsäpaloissa. [http://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja\\_B/B1\\_2022.pdf](http://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja_B/B1_2022.pdf). 2.2.2025

Lindberg, H., Heikkilä, T. V. & Vanha-Majamaa, I. 2011. Suomen metsien paloainekset. Kohti parempaa tulen hallintaa.

McCrea, R. 2023. Overview 2023: United States. Fewer fires, bigger impact. International Association of Wildland Fire. <https://www.iawfonline.org/article/overview-2023-united-states/>. 11.12.24.

Mänttari, J. 2022. Maastopalojen maasammutustoiminnan konseptin muodostaminen pelastustoimessa. Sisäministeriö. www-dokumentti. [https://pelastustoimi.fi/documents/25266713/110932926/Liite\\_9a\\_Maastopalojen\\_maasammutustoiminnan\\_konseptin\\_muodostaminen\\_Laaja-versio.pdf/ef5c7647-9680-0667-6ea8-f8cfc1fc5b38/Liite\\_9a\\_Maastopalojen\\_maasammutustoiminnan\\_konseptin\\_muodostaminen\\_Laaja-versio.pdf?t=1646811687343](https://pelastustoimi.fi/documents/25266713/110932926/Liite_9a_Maastopalojen_maasammutustoiminnan_konseptin_muodostaminen_Laaja-versio.pdf/ef5c7647-9680-0667-6ea8-f8cfc1fc5b38/Liite_9a_Maastopalojen_maasammutustoiminnan_konseptin_muodostaminen_Laaja-versio.pdf?t=1646811687343). 11.12.2024.

Nieminen, A. 2020. Metsäpalariskin ennakointi metsätoissa. www-dokumentti. <https://tapio.fi/wp-content/uploads/2020/06/Metsapalariskin-ennakointi-metsatoissa-opas-Tapio-2020.pdf>. 30.3.2025.

Nyman, P. 2018. Sammutusjätevesien hallinta ja sammutusvaahdot. Ympäristönsuojelun haasteita ja kehitystarpeita pelastusalan näkökulmasta. Opinnäytetyö. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/158620/NYMAN\\_PIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/158620/NYMAN_PIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y). 13.4.2025.

Pelastusopisto. Metsäpalovarautuminen pelastuslaitoksilla 2025 – MPV25. <https://www.pelastusopisto.fi/tutkimus-ja-kehitys/hankkeet/metsapalo-varautuminen-pelastuslaitoksilla-2025-mpv25/>. 7.4.2025.

Perimeter Solutions 2022. Long-Term Fire Retardants: History, innovation and preparing for the future of wildfires. www-dokumentti. [https://www.perimeter-solutions.com/wp-content/uploads/2022/05/PERI1216\\_LTR\\_White\\_Paper\\_v4b.pdf](https://www.perimeter-solutions.com/wp-content/uploads/2022/05/PERI1216_LTR_White_Paper_v4b.pdf). 1.4.2025.

Pronto 2025. <https://prontonet.fi/>. 10.4.2025.

Puustinen, A., Ala-Honkola, H., Bergman, T., Kauranne, T., Kiviranta, K., Leppänen, V., Leskinen, L., Luoto, M., Puumalainen, T., Suvanto, H., Tolonen, L. & Viertola, M. 2022. Maastopalojen leviämismallit ja jalostettu metsävaratieto osana pelastustoimen tilannekuvan muodostamista. Pelastusopisto. www-dokumentti. [http://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja\\_D/D6\\_2022.pdf](http://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja_D/D6_2022.pdf). 2.2.2025.

RDR Technologies. What Is in Fire Retardants Dropped From Planes? <https://rdstechnologies.com/blog/fire-retardant-dropped-planes?srsId=AfmBOopC4oaCV6tyRnHqHCstoPEY-vxF9HJIRhXQkUS8GeiD7I3hrZ8c9>. 11.12.2024.

Salo, H. 2009. Torjutaan turvepaloja. www-dokumentti. <https://www.bioenergia.fi/wp-content/uploads/2020/02/Torjutaan-turvepaloja-3.4.2009-1.pdf>. 11.12.2024.

Sanastokeskus. Tapa-termipankki. <https://termipankki.fi/tapa/fi/>. 24.3.2025.

Sikanen, T. 2009. Kipinät metsäpalojen levittäjinä. Valtion teknillinen tutkimuskeskus VTT. [http://info.smedu.fi/kirjasto/PTP09/PTP09\\_Sivut%20103-107.pdf](http://info.smedu.fi/kirjasto/PTP09/PTP09_Sivut%20103-107.pdf).

Spanne, A. 2021. We're dumping loads of retardant chemicals to fight wildfires. What does it mean for wildlife? EHN Environmental Health News. <https://www.ehn.org/fire-retardant-spray-wildfire-wildlife-2655069755.html>. 11.12.2024.

SPEK 2000. Metsäpalot. Suomen pelastusalan keskusjärjestö. Helsinki.

Tarvainen, A. 2023. Koneoppimisen hyödyntäminen metsä- ja maastopalojen havaitsemisessa droneilmakuvista. Tietotekniikan kandidaatintutkielma. [https://jyx.jyu.fi/jyx/Record/jyx\\_123456789\\_87176](https://jyx.jyu.fi/jyx/Record/jyx_123456789_87176). 11.12.2024.

Toivanen 2022a. Xpyro. Bonsoguard - sammutus- ja ennaltaehkäisyaineet. Väliraportti. Pelastusopisto.

Toivanen 2022b. Xpyro Oy. Bonsoguard - Prefirex ennaltaehkäisyaineen tuotetestaus. Pelastusopisto.

U.S. Department of Agriculture Forest Service. Wildland fire chemicals. www-dokumentti. <https://www.fs.usda.gov/science-technology/fire/wildland-fire-chemicals>. 7.1.2025.

Vehkaoja, M. 2020. Viisas varautuu hyvän sään aikaan. Ilmastonmuutoksen vaikutukset pelastustoimintaan. Opinnäytetyö. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/270976/vehkoja\\_markus.pdf?sequence=2](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/270976/vehkoja_markus.pdf?sequence=2).

Venäläinen, A., Lehtonen, I. & Mäkelä, A. 2016. Laaja-alaisia metsäpaloja mahdollistavat säätilanteet Suomen ilmastossa. Ilmatieteenlaitos. <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/1d492c98-81a3-46f6-a11c-83afa657b61f/content>. 2.1.2025.

Ziemann, M. 2018. Suomalaisyritys keksi ainutlaatuisen aineen metsäpalojen sammutukseen – "saippuan hintaista" nestettä tarjotaan nyt Ruotsin metsäpaloihin. Yle. <https://yle.fi/a/3-10333036>. 3.4.2025.