

Maria Rautiainen

# **METSÄPALOJEN JA NIIDEN SAMMUTUKSEN VAIKUTUKSET PINTA- JA POHJAVESIIN**

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Hannele Auvinen  
Huhtikuu 2026

# TIIVISTELMÄ

Maria Rautiainen: Metsäpalojen ja niiden sammutuksen vaikutukset pinta- ja pohjavesiin  
Impacts of forest fires and fire suppression on surface and groundwater systems  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka  
Huhtikuu 2026

---

Metsäpalot ovat luonnollinen osa metsäekosysteemien toimintaa ja kiertokulkua, mutta niiden määrä ja voimakkuus voivat kasvaa tulevaisuudessa merkittävästi ilmastonmuutoksen myötä. Tällöin myös palojen aiheuttamien ekologisten, sosiaalisten ja taloudellisten vaikutusten merkittävyys lisääntyy. Metsäpalojen aiheuttamista ympäristövaikutuksista tarkastellaan useimmiten ilmakehään ja biodiversiteettiin kohdistuvia vaikutuksia. On kuitenkin tärkeää huomioida, että metsäpaloilla on merkittäviä vaikutuksia myös maaperään ja veteen.

Tässä työssä tarkastellaan metsäpalojen vaikutuksia pinta- ja pohjavesiin sekä mekanismeja, joilla vaikutukset muodostuvat. Työssä tarkastellaan myös metsäpalojen sammutusta ja sen aiheuttamia ympäristövaikutuksia. Näiden lisäksi työssä perehdytään ilmastonmuutoksen ja metsäpalojen väliseen yhteyteen. Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena, ja sen tavoitteena on selvittää, millaisia vaikutuksia metsäpaloilla on pinta- ja pohjavesiin. Tarkastelu rajataan boreaaliin metsiin, joita esiintyy muun muassa Suomessa, Kanadassa ja Yhdysvalloissa.

Työn tuloksena havaittiin, että metsäpalot lisäävät pintavesiin kulkeutuvan kiintoaineen, ravinteiden ja haitta-aineiden määrää. Vesistöjen muutokset ovat vahvasti sidoksissa maaperän muutokseen, sillä metsäpalot muuttavat maaperän rakennetta niin, että pintavalunta lisääntyy. Valunnan mukana vesistöön kulkeutuu eroosion myötä maaperästä irronnutta kiintoainesta sekä palossa vapautuneita aineita ja sammutusaineita. Seurauksena tästä voi olla muun muassa veden laadun heikkeneminen, sameuden lisääntyminen tai vesistön rehevöityminen. Nämä muutokset vaikuttavat vesiekosysteemiin ja voivat aiheuttaa esimerkiksi kalakuolemia.

Pohjavesien osalta havaittiin, että metsäpalo voi vaikuttaa sekä pohjaveden määrään että laatuun. Kasvillisuuden poistumisen ja maaperän muutosten myötä pohjavettä voi muodostua lähtötilannetta enemmän tai vähemmän riippuen palon ja palaneen alueen ominaisuuksista. Pohjaveen voi päästä kulkeutumaan esimerkiksi ravinteita tai haitta-aineita, jotka heikentävät veden laatua ja voivat aiheuttaa haittaa pohjaveden käytössä talousvedentuotannossa.

Ilmastonmuutoksen arvioidaan lisäävän metsäpalojen määrää ja voimakkuutta myös maapallon pohjoisosissa, mikä lisää palojen ympäristövaikutusten merkittävyyttä. Työn perusteella voidaan todeta, että metsäpalojen aiheuttamien ympäristövaikutusten kokonaisuus on monimutkainen ja tapauskohtainen, mikä haastaa vaikutusten ennakkointia. Lisätutkimusta tarvitaan metsäpalojen vaikutuksista vesistöihin erityisesti pohjoisilla alueilla, ja sammutusaineiden ympäristövaikutuksista.

Avainsanat: metsäpalo, ympäristövaikutus, vesistökuormitus, pintavesi, pohjavesi, ilmastonmuutos, vedenlaatu, ravinteet, sammutusmenetelmät

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check –ohjelmalla.

Opinnäytteessäni käytetyt tekoälytyökalut ja niiden käyttötarkoitukset on kuvailtu alla:

ChatGPT 5.2: Sisällysluettelon hahmottelu, johdannon rakenteen suunnittelu ja kuvien 2 ja 3 suunnittelu

Microsoft Copilot: Työn nimen kääntäminen englanniksi ja yksittäisten virkkeiden muotoilu

Scopus AI: Lähdekirjallisuuden etsiminen, artikkelien tiivistelmät ja aiheeseen perehtyminen

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien tekoälyllä tuotetut osat, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

# SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO .....	1
2 METSÄPALOT ILMIÖNÄ .....	3
2.1 Metsäpalojen syttyminen .....	3
2.2 Syttymiseen ja leviämiseen vaikuttavat tekijät.....	4
2.3 Metsäpalojen yhteys ilmastonmuutokseen.....	6
2.4 Metsäpalojen sammutus.....	7
3 METSÄPALOJEN VAIKUTUKSET VALUMA-ALUEESEEN .....	10
3.1 Maaperän muutokset .....	10
3.2 Biodiversiteetin muutokset.....	12
4 VAIKUTUKSET PINTAVESIIN .....	15
4.1 Aineiden kulkeutuminen vesistöihin .....	15
4.2 Pintavesien kemialliset ja biologiset muutokset.....	16
4.3 Sammutusaineiden vaikutukset vesiekosysteemeihin.....	19
5 VAIKUTUKSET POHJAVETEEN .....	22
5.1 Pohjaveden muodostumisen muutokset .....	22
5.2 Pohjaveden laadun muutokset.....	23
6 JOHTOPÄÄTÖKSET .....	26
LÄHTEET .....	28

# 1 JOHDANTO

Metsäpalot ovat luonnollinen osa monien metsäekosysteemien kiertokulkua ja kehitystä, mutta samalla ne aiheuttavat merkittäviä vaikutuksia sekä ympäristölle, ihmisille että taloudelle. Erityisesti pohjoisilla metsäalueilla palojen esiintyminen on voimakkaasti sidoksissa ilmastollisiin tekijöihin, kuten lämpötilaan ja kuivuuteen, joihin ilmastonmuutos vaikuttaa. Täten palojen yleisyyden ja laajuuden ennustetaan lisääntyvän huomattavasti tulevina vuosina ilmastonmuutoksen myötä (Wasserman & Mueller, 2023). Metsäpalojen lisääntyessä myös niiden aiheuttamat ympäristövaikutukset lisääntyvät.

Metsäpalot ovat maailmanlaajuisesti merkittävä ilmiö, sillä vuosittain palaa arviolta 3–5 miljoonaa neliökilometriä maata (Jones *et al.*, 2022). Myös Suomessa metsäpalot ovat melko yleisiä, ja paloja sytty vuosittain noin 400–2400. Tehokkaan sammutuksen ansiosta suurin osa Suomessa syttyvistä paloista jää kuitenkin laajuudeltaan vähäisiksi ja aiheuttaa vain rajallisia vahinkoja. (Tapio, 2026) Metsäpalojen suuren kokonaismäärän vuoksi niistä vapautuu merkittäviä määriä kasvihuonekaasuja, jotka osaltaan kiihdyttävät ilmastonmuutosta (Martinho, 2019). Tämän vuoksi metsäpalojen hallinta ja ehkäisy ovat tärkeitä keinoja palojen ilmasto- ja ympäristövaikutusten rajoittamisessa.

Metsäpalojen aiheuttamat ympäristövaikutukset ovat monimutkainen kokonaisuus, joka muodostuu useiden eri tekijöiden yhteisvaikutuksen myötä. Vaikutukset ja niiden merkittävyys riippuvat palon ja palaneen alueen ominaisuuksista, ja voivat vaihdella huomattavasti eri palojen välillä (Bladon *et al.*, 2014). Tämä tekee vaikutusten arvioinnista ja ennakoinnista haastavaa.

Metsäpalon näkyvimmat ympäristövaikutukset kohdistuvat kasvillisuuteen, ilmakehään ja maaperään. Näiden lisäksi paloilla ja niiden sammutustoimilla on merkittäviä vaikutuksia myös alueen pinta- ja pohjavesiin. Vesistöt ovat vahvasti yhteydessä metsäekosysteemiin ja sen tilaan, jolloin myös metsäpalojen vaikutukset ulottuvat vesistöihin. Palot voivat heikentää veden laatua muun muassa lisäämällä kiintoaineen, ravinteiden ja haitta-aineiden huuhtoutumista vesistöihin (Basso *et al.*, 2021). Pohjaveden määrä voi muuttua metsäpalon jälkeen, sillä maaperän ominaisuuksien muuttuminen vaikuttaa veden imeytymiseen (Banton *et al.*, 2025). Sammutuksessa käytettävät kemikaalit voivat aiheuttaa eliöille haittaa akuutisti tai pitkäaikaisen altistuksen myötä (Anderson & Prosser, 2023).

Tässä työssä tarkastellaan metsäpalojen vaikutuksia pinta- ja pohjavesiin. Tarkastelun kohteena ovat myös metsän maaperässä ja biodiversiteetissä tapahtuvat muutokset, sillä niillä on merkittävä vaikutus vesistön valuma-alueen ominaisuuksiin ja pohjaveden muodostumiseen. Työssä tarkastellaan myös metsäpalojen sammutusta ja sen aiheuttamia ympäristövaikutuksia. Ympäristövaikutusten lisäksi työssä käsitellään metsäpalojen yhteyttä ilmastonmuutokseen, jotta voidaan arvioida palojen ja niiden ympäristövaikutusten kehitystä tulevaisuudessa.

Työn tavoitteena on selvittää, millaisia vaikutuksia metsäpalot ja niiden sammutus aiheuttavat vesistöille ja pohjavedelle. Työssä tarkastellaan ympäristövaikutusten ohella metsäpalojen syttymistä ja siihen vaikuttavia tekijöitä sekä ilmastonmuutoksen vaikutusta metsäpalojen yleisyyteen ja laajuuteen. Tarkastelu kohdistuu boreaalisiin metsiin, joita esiintyy muun muassa Kanadassa, Venäjällä, Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa. Työn tutkimuskysymykset ovat:

1. Mitkä tekijät vaikuttavat metsäpalojen syttymiseen ja laajuuteen?
2. Millaisia vaikutuksia metsäpaloilla on pinta- ja pohjavesiin?
3. Miten metsäpaloja sammutetaan ja millaisia ympäristövaikutuksia sammutus aiheuttaa?

Luvussa 2 esitellään metsäpaloja ilmiönä, eli niiden syttymistä, sammutusta ja yhteyttä ilmastonmuutokseen. Luvussa 3 tarkastellaan metsäpalojen vaikutusta valuma-alueen maaperään ja biodiversiteettiin. Neljännessä luvussa tarkastellaan pintaveden kohdistuvia vaikutuksia ja arvioidaan niiden merkitystä vesiekosysteemeille. Luvussa 5 tarkastellaan metsäpalon aiheuttamia vaikutuksia pohjaveden muodostumiselle ja laadulle sekä mahdollisia vaikutuksia talousvedentuotannolle.

## 2 METSÄPALOT ILMIÖNÄ

Tässä luvussa tarkastellaan metsäpalojen syttymisen syitä, syttymiseen vaadittavia olosuhteita sekä ilmastonmuutoksen vaikutusta metsäpalojen yleisyyteen ja laajuuteen. Lisäksi tarkastellaan metsäpalojen sammutukseen käytettäviä menetelmiä ja sammutusaineita.

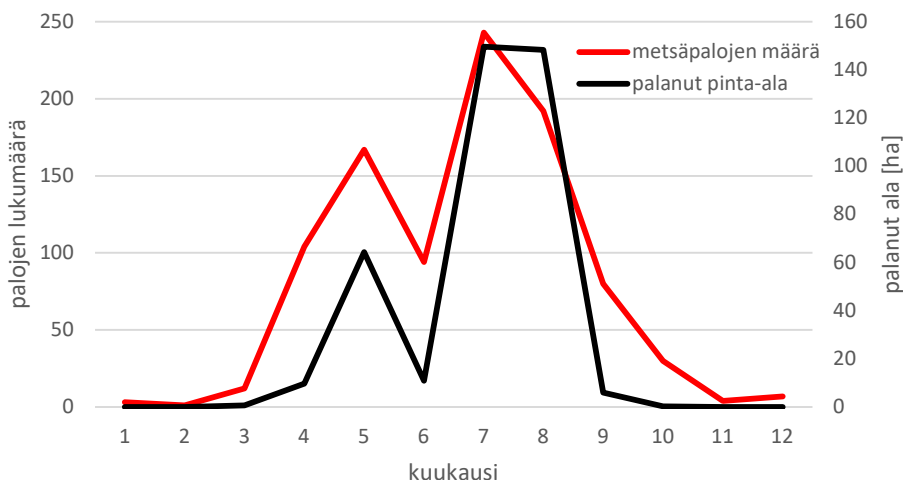
### 2.1 Metsäpalojen syttyminen

Metsäpalojen syttymisen syyt voidaan jakaa luonnollisiin ja ihmisen aiheuttamiin syihin. Luonnollisia syitä ovat esimerkiksi salamaniskut ja sääolosuhteet. Ihmisen aiheuttamia paloja ovat muun muassa tuhopoltot sekä viallisista koneista tai huolimattomuudesta aiheutuvat metsäpalot. (Ganteaume *et al.*, 2013)

Metsäpalojen eri syttymissyiden yleisyys vaihtelee alueittain. Paloista, joiden syttymissy on saatu selville, luonnollisista syistä syntyneitä on Pohjois-Euroopassa 7,3 %. Suomessa osuus on korkeampi, sillä paloista 13 % syttyy salamaniskusta, joka on luonnollinen syy. (Ganteaume *et al.*, 2013) Suurin osa Suomessa syttyivistä metsäpaloista syttyy ihmisten huolimattomuuden tai vahinkojen seurauksena (Luonnonvarakeskus, 2026). Tällaisia ovat esimerkiksi nuotiosta, risujen poltosta tai maahan heitetystä tupakasta alkaneet palot. Valtaosa metsäpaloista on siis ihmisen aiheuttamia, ja luonnollisista syistä syntyneitä on melko vähän.

Metsäpalojen yleisyydessä ja syttymissyissä havaitaan alueellista vaihtelua myös pienessä mittakaavassa, sillä metsäpalot ovat yleisempiä asutuksen tai teiden läheisyydessä kuin erämaissa (Ganteaume *et al.*, 2013). Tämä johtuu todennäköisesti ihmisten aiheuttamien palojen suuresta osuudesta, jolloin ihmisten läsnäolon lisääntyminen alueella kasvattaa palojen todennäköisyyttä. Myös sosiaalisilla tekijöillä, kuten köyhyydellä ja työttömyydellä on havaittu olevan yhteys metsäpalojen yleisyyteen (Ganteaume *et al.*, 2013).

Metsäpalojen syttymisessä on myös ajallista vaihtelua. Suurin osa salamaniskuista syttyivistä paloista syttyy muutaman päivän aikana vuodessa, jolloin olosuhteet ovat otollisimmat palojen syttymiselle. Ihmisen toiminnasta johtuvia paloja syttyy jatkuvasti pitkin vuotta, sillä ihmisen paloja aiheuttava toiminta jakautuu ajallisesti tasaisemmin. (Ganteaume *et al.*, 2013) Kuvassa 1 esitetään metsäpalojen lukumäärän ja palaneen pinta-alan jakautuminen eri kuukausille Suomessa vuonna 2025.



**Kuva 1: Suomessa vuonna 2025 syttyneiden palojen määrä ja palanut pinta-ala kuukausittain, perustuu lähteeseen (Luonnonvarakeskus 2026)**

Kuvasta 1 havaitaan, että valtaosa Suomessa syttyivistä metsäpaloista syttyy kesällä. Paloja sytty huomattavan paljon myös keväällä maaliskuu-toukokuussa, mutta tällöin palanut alue on melko pieni. Syynä ovat sääolosuhteet, sillä keväällä lämpötila ei ole yhtä korkea eikä kasvillisuus yhtä kuivaa kuin myöhemmin kesällä, minkä vuoksi palo ei leviä laajalle alueelle. Eniten paloja sytty heinäkuussa, ja palanut ala on suurimmillaan heinä- ja elokuussa, jolloin myös lämpötila on yleensä korkein.

## 2.2 Syttymiseen ja leviämiseen vaikuttavat tekijät

Metsäpalon syttymiseen tarvitaan palavaa ainetta, happea ja syttymislähde (Government of the Northwest Territories, n.d.). Mahdollisia syttymislähteitä ovat esimerkiksi luvussa 2.1 mainitut salamaniskut, nuotion kipinät tai tahallinen sytytys. Metsäpalon leviämiseen vaikuttavat monet tekijät, kuten palavan materiaalin määrä ja kuivuus, maastonmuodot sekä sääolosuhteet.

Jotta metsäpalo voi syttyä ja levitä, tulee palavaa materiaalia kuten kuivia puita tai pensaikkoa olla riittävästi. Helposti syttyvää materiaalia on esimerkiksi kuiva ruoho, lehdet ja neulaset, jotka palavat nopeasti. Puiden rungot ja kannot syttyvät hitaammin, mutta palavat pidempään ja vapauttavat enemmän lämpöä. Palava ruoho ja lehdet sytyttävät usein puita ja muuta hitaammin palavaa materiaalia sekä levittävät paloa uusille alueille nopeasti. (Government of the Northwest Territories, n.d.) Kasvillisuuden syttymisherkkyys vaihtelee myös kasvillisuustyypin mukaan. Esimerkiksi havupuut sisältävät paljon pihkaa ja muita helposti palavia aineita, mikä nopeuttaa palon etenemistä havumetsissä (Zhou *et al.*, 2025).

Kasvillisuuden syttymisherkkyteen vaikuttaa merkittävästi sen kuivuus. Mikäli kasvillisuus on kosteaa, se ei syty eikä palo pääse leviämään, vaikka syttymislähde olisi olemassa. Sääolosuhteet vaikuttavat kasvillisuuden kosteuteen, sillä sateiden vähäisyys laskee ilmankosteutta, jolloin kasveista haihtuu paljon vettä ja palon todennäköisyys kasvaa (Government of the Northwest Territories, n.d.). Myös ilman lämpötilalla on merkittävä vaikutus kasvien syttymisherkkyteen, sillä korkea lämpötila vähentää maaperän ja kasvien kosteutta (Parvar *et al.*, 2024). Auringon lämmittämät kasvit myös syttyvät helpommin (Government of the Northwest Territories, n.d.). Suomessa ilmastotekijöiden vaikutus havaitaan vertailtaessa metsäpalojen määrää etelän ja pohjoisen välillä, sillä Etelä-Suomessa metsäpalojen yleisyys voi olla jopa kymmenkertainen viileämpään Pohjois-Suomeen verrattuna (Ganteaume *et al.*, 2013). Myös tuuli nopeuttaa metsäpalon leviämistä merkittävästi, sillä se tuo paloon lisää happea sekä lennättää kipinöitä ja palavaa ainetta uusille alueille (Government of the Northwest Territories, n.d.).

Palavan aineen ominaisuuksien lisäksi sen sijainnilla on suuri vaikutus palon etenemiseen. Tuli voi levitä pysty- tai vaakasuuntaan eli palavan aineen yläpuolella olevaan materiaaliin tai maan pinnan suuntaisesti. Tulen leviämistä voivat rajoittaa katkot palavassa aineessa, kuten kalliot tai vesistöt, sillä tuli ei pääse leviämään esteiden yli yhtä helposti. Tätä voidaan hyödyntää palojen leviämisen rajaamisessa tekemällä palokatkoja palavan aineen ja palamattoman alueen välille poistamalla kasvillisuutta. (Government of the Northwest Territories, n.d.) Palojen leviämistä voidaan ehkäistä metsänhoidollisilla toimenpiteillä, kuten harvennuksella tai kuolleen materiaalin poistamisella, joilla vähennetään palavan materiaalin määrää metsässä (Tapio, 2026).

Myös maaston pinnanmuodot vaikuttavat metsäpalojen syttymiseen ja leviämiseen. Suuret korkeuserot vaikuttavat paikan sääolosuhteisiin, auringonpaisteen voimakkuuteen alueella ja lämpötilaan (Parvar *et al.*, 2024). Mäen etelärinteeseen auringonpaistetta osuu yleensä eniten, jolloin kasvillisuus on kuivempaa. Mäkisyys vaikuttaa merkittävästi myös palon leviämiseen. Jyrkissä rinteissä palo leviää nopeasti ylämäkeen, kun liekit lämmittävät ja kuivattavat kasvillisuutta ennen sen syttymistä. Myös tuuli ja ilmavirrat työntävät liekkejä usein ylämäkeen päin. (Government of the Northwest Territories, n.d.)

Suomessa metsäpalon syttymisherkkyttä arvioidaan maastopaloindeksillä. Se määritetään laskukaavalla, jossa huomioidaan sääolosuhteet kuten sademäärä, tuulen nopeus ja lämpötila. Indeksien perusteella annetaan tarvittaessa maastopalovaroitus, jotta metsäpaloille altistavaa toimintaa kuten nuotioiden sytyttämistä voidaan välttää. (Ilmatieteen laitos, n.d.)

## 2.3 Metsäpalojen yhteys ilmastonmuutokseen

Ilmastonmuutoksen ennakoidaan lisäävän metsäpalojen yleisyyttä ja laajuutta merkittävästi (Jones *et al.*, 2022). Syynä on metsäpaloille altistavien sääolosuhteiden, eli kuivouden ja korkeiden lämpötilojen lisääntyminen ilmastonmuutoksen myötä. Kansainvälisen ilmastopaneelin IPCC:n raportin mukaan vuosittain palavan alueen koolla on suora yhteys ilmastonmuutokseen. Jos ilmastonmuutosta ei saada hillittyä nykyisestä ja maapallon keskilämpötila nousee 4°C, metsäpalojen määrä kasvaa noin 30 % ja vuosittain palava alue 50–70 %. (Calvin *et al.*, 2023) Palava alue kasvaa siis enemmän kuin metsäpalojen määrä, mikä tarkoittaa palojen koon kasvavan nykyisestä.

Ilmastonmuutoksen vaikutus voidaan havaita tarkasteltaessa metsäpalokauden pituutta eli paloille altistavien sääolosuhteiden esiintymistä. Jones *et al.* (2022) tutkimuksen mukaan metsäpalokauden pituus on kasvanut merkittävästi vuosina 1979–2019. Tutkimuksen tarkastelukohteista parhaiten Suomen olosuhteita vastaavalla Pohjois-Amerikan borealisella vyöhykkeellä metsäpalokauden pituus on 40 vuoden aikana pidentynyt 30 % ja on nykyään keskimäärin 12 päivää vuodessa. (Jones *et al.*, 2022) Ilmastonmuutoksen vaikutukset havaitaan siis selvästi jo nyt tarkasteltaessa viimeisimpiä vuosikymmeniä, ja kehityksen ennustetaan jatkuvan samansuuntaisena.

Metsäpalot myös nopeuttavat ilmastonmuutosta, sillä niistä vapautuu merkittäviä määriä kasvihuonekaasuja, kuten hiilidioksidia, metaania ja typpidioksidia. Maailmanlaajuisesti hiilidioksidia vapautuu ilmakehään arviolta 7,3 Gt vuodessa ja metaania 16 Mt. (van der Werf *et al.*, 2017). Määrää voidaan verrata Suomen vuosittaisiin hiilidioksidipäästöihin, jotka olivat vuonna 2024 noin 49 Mt CO<sub>2</sub>/v (Tilastokeskus, 2025). Täten metsäpaloista vapautuu noin 150-kertainen määrä hiilidioksidia Suomen vuosittaisiin päästöihin verrattuna. Metsäpalojen ja ilmastonmuutoksen yhteys on siis kaksisuuntainen, sillä palojen lisääntyessä ilmastonmuutoksen myötä vapautuu enemmän kasvihuonekaasuja, jotka edelleen nopeuttavat ilmastonmuutosta (Jones *et al.*, 2022).

Metsäpalot vaikuttavat myös maapallon albedoon eli maan pinnasta heijastuvan säteilyn määrään. Palossa hiiltynyt alue heijastaa vähemmän säteilyä palamattomaan pintaan verrattuna. Lisäksi paloista vapautuvan tuhkan ja muiden partikkelien laskeutuminen lumen ja jään pinnalle vähentää takaisin avaruuteen heijastuvan säteilyn määrää. (Ward *et al.*, 2012) Näin ollen metsäpalot voivat lisätä maapallon lämpenemistä, kun pienempi osa maapallolle saapuvasta säteilystä heijastuu takaisin ilmakehään.

Palojen vaikutukset säteilytaseeseen eivät kuitenkaan ole suoraviivaisesti negatiivisia, sillä metsäpalojen aiheuttamat muutokset ovat monimutkaisia. Palossa paljastunut maan

pinta voi heijastaa säteilyä paremmin kuin alkuperäinen peite, jolloin albedo kasvaa. Tämän lisäksi paloissa vapautuneet aerosolit voivat lisätä pilvien määrää toimimalla pilvien tiivistymisytiminä. Pilvet heijastavat säteilyä maata paremmin, mikä lisää heijastuneen säteilyn määrää suhteessa maapallolla saapuneeseen säteilyyn. (Ward *et al.*, 2012) Metsäpalojen vaikutukset maapallon säteilytaseelle ovat siis monimutkaisia ja haastavia määrittää, mutta niiden huomioiminen on tärkeää säteilytaseen ilmastovaikutuksen vuoksi.

## 2.4 Metsäpalojen sammutus

Metsäpalojen sammuttamiseen on erilaisia menetelmiä, joiden joukosta voidaan valita kyseiseen paloon parhaiten soveltuva menetelmä tai niiden yhdistelmä. Paloja voidaan sammuttaa suoraan tai epäsuoraan pyrkimällä poistamaan jokin kolmesta palamisen vaatimuksesta eli palava materiaali, happi tai riittävä lämpötila.

Epäsuorassa sammutuksessa tulta ei pyritä sammuttamaan, vaan sen leviämistä rajoitetaan rajoituslinjojen avulla. Rajoituslinjoja voidaan tehdä poistamalla kasvillisuus tietyistä maastonkohdasta, jolloin palo ei pääse leviämään linjan yli uusille alueille. (Metsäkeskus, 2022) Kasvillisuuden poistamiseen voidaan käyttää esimerkiksi maansiirtokalustoa (Mänttari, 2022). Rajoituslinjojen käyttöön liittyy epävarmuutta, jos palon etenemissuunta muuttuu tuulen suunnan vaihtumisen vuoksi (Plucinski *et al.*, 2017).

Suorassa sammutuksessa metsäpalo sammutetaan ruiskuttamalla siihen vettä tai sammutusainetta maasta tai ilmasta käsin. Maantasolla metsäpaloja sammutetaan paloautoilla. Suomessa erityisen tärkeä sammutuksen mahdollistava tekijä on tiheä ja hyväkuntoinen metsätieverkosto, jota pitkin paloautot pääsevät syrjäisemmillekin alueille. (Tapio, 2026) Käytössä on myös sammutustarkoitukseen rakennettuja metsäkoneita, joissa on suuri vesisäiliö. Näiden koneiden etuna on mahdollisuus liikkua hankalassa maastossa. (Mänttari, 2022)

Ilmasta sammuttamisen etuna on nopea pääsy vaikeakulkuisiin maastoihin ja veden helppo nouto vesistöistä (Kal'avský *et al.*, 2019). Suomessa metsäpalojen sammuttamiseen käytetään Rajavartiolaitoksen ja Puolustusvoimien helikoptereita, joihin kiinnitetään helikopterin koosta riippuen 1–2 m<sup>3</sup> tilavuudeltaan oleva vesipussi. Helikoptereilla vettä saadaan haettua pienistäkin vesistöistä, mutta päätarkoituksena on yleensä palon rajaaminen eikä varsinainen sammuttaminen, sillä sammuttamiseen tarvittava vesimäärä on liian suuri helikopterien kapasiteettiin verrattuna. Tärkeä hyöty helikopterien käytössä on myös mahdollisuus havainnoida paloa ja sen etenemistä ilmasta käsin. (Helin, 2021)

Yleisin metsäpalojen sammuttamiseen käytettävä aine on vesi, sillä se on edullista ja yleensä helposti saatavilla. Myös sammutusaineita voidaan käyttää, mutta valinnassa on huomioitava muun muassa aineiden sammutustehokkuus, ympäristö- ja ilmastovaikutukset, haitallisuus ihmisille sekä saatavuus ja hinta. (Gao *et al.*, 2025)

Vesi sammuttaa tulipaloa viilentämällä palavaa materiaalia ja estämällä hapen pääsyä tuleen luomalla eristävän kerroksen palavan materiaalin ja ilman väliin. Vesi viilentää paloa tehokkaasti suuren ominaislämpökapasiteettinsa ja höyrystymiseen vaadittavan energian vuoksi. Vesi ei kuitenkaan ole täydellinen sammutusaine, sillä se haihtuu nopeasti, mahdollisesti jo ilmassa ennen kosketusta palavaan materiaaliin, mikä heikentää sen sammutustehoa. Lisäksi veden korkea pintajännitys heikentää sen kykyä peittää ja kastella palava materiaali. (Plucinski *et al.*, 2017)

Veden sammutusominaisuuksien parantamiseksi siihen voidaan lisätä erilaisia kemikaaleja, jotka muuttavat veden fysikaalisia ominaisuuksia. Vaahdotusaineessa tärkein ainesosa ovat tensidit eli pinta-aktiiviset aineet, jotka pienentävät veden pintajännitystä. Tämä parantaa veden kykyä peittää palava aine ja pidentää veden kastelevan vaikutuksen kestoa. Samalla vaahto estää liekkien hapensaannin muodostamalla eristävän kerroksen palavan materiaalin ja ilman väliin. (Plucinski *et al.*, 2017)

Aiemmin sammutusvaahdoissa on käytetty PFAS-yhdisteitä, eli per- ja polyfluorattuja alkyylilyhdisteitä. PFAS-yhdisteet ovat ikuisuuskemikaaleja, jotka hajoavat erittäin hitaasti, saastuttavat pohja- ja pintavettä ja aiheuttavat haittoja eliöstölle. (Ateia & Scheringer, 2024) Niiden käyttöä on pyritty vähentämään, ja nykyiset metsäpalojen sammutukseen käytettävät vaahdot eivät sisällä näitä yhdisteitä (Gao *et al.*, 2025).

Myös erilaisia geelejä voidaan käyttää palojen sammutukseen, mutta niiden käyttö on huomattavasti vaahtoja harvinaisempaa. Geeliä muodostava lisäaine koostuu hydrofiilistä polymeereistä, jotka imevät jopa 700-kertaisesti oman massansa verran vettä. Se lisää veden viskositeettiä ja tarttumista palavaan aineeseen sekä vähentää kulkeutumista tuulen mukana ilmasta pudotettaessa. (Plucinski *et al.*, 2017) Geelin käyttö vähentää veden tarvetta merkittävästi ja voi täten auttaa metsäpalojen sammutuksessa alueilla, joilla vettä ei ole saatavilla riittävästi. Geelien käytön haasteena on, ettei niiden ympäristövaikutuksia tai tehoa metsäpalojen sammuttamisessa tunneta vielä tarkasti. (Gao *et al.*, 2025)

Palon leviämisen hillitsemiseksi voidaan käyttää palonestoaineita, joita levitetään paloalueen reunoille palamattoman kasvillisuuden suojaksi yleensä lentokoneista. Palonestoaineet koostuvat epäorgaanisista suoloista, yleensä ammoniumfosfaatista, jota käytetään myös lannoitteena. Palonestoaineet hidastavat kasvillisuuden palamista, viilentävät

ja peittävät kasvillisuutta sekä estävät hapen pääsyn sen pinnalle. (Plucinski *et al.*, 2017) Osa palonestoaineista on värjätty punaiseksi, jotta levitysalue voidaan hahmottaa helposti. Aineita kuten PHOS-CHEK ja FIRE-TROL on saatavilla eri viskositeeteilla, ja ne toimitetaan veteen sekoitettavana jauheena tai nesteenä (Perimeter Solutions, n.d.).

Suomessa palonestoaineet eivät ole yleisesti käytössä, vaan sammutus perustuu veteen ja rajoituslinjojen raivaamiseen. Palonestoaineiden tarvetta vähentää metsäpalojen vähäisempi voimakkuus ja laajuus verrattuna esimerkiksi Pohjois-Amerikan tai Australian metsäpaloihin. Palonestoaineen käyttöä on kuitenkin kokeiltu ainakin Kalajoen suuressa maastopalossa vuonna 2021, jossa sitä levitettiin sammutustarkoitukseen rakennetulla metsäkoneella. Aine esti palon syttymisen uudelleen, joten se todettiin tehokkaaksi. (Mänttari, 2022)

Kaupallisten veteen lisättävien aineiden koostumuksesta ei ole tarkkaa tietoa saatavilla, sillä aineet ovat patentoituja (Anderson & Prosser, 2023). Sammutukseen käytettävien aineiden valinnassa tulee huomioida sekä aineen tehokkuus että sen aiheuttamat vaikutukset ympäristölle. Tasapainon löytäminen näiden välillä voi olla haastavaa, sillä esimerkiksi asutusta uhkaavan palon sammuttaminen voi olla tärkeämpää kuin ympäristöhaittojen välttäminen. Tehokas sammutus myös estää palon leviämisen uusille alueille ja siten vähentää palosta aiheutuvia haittoja. Toisaalta paloa, joka ei aiheuta suuria taloudellisia riskejä tai haittaa ihmisille, ei välttämättä kannata sammuttaa käyttäen kovin haitallisia aineita, sillä tällöin sammutuksen haitat voivat kasvaa hyötyjä suuremmiksi.

## 3 METSÄPALOJEN VAIKUTUKSET VALUMA-ALUEESEEN

Tässä luvussa käsitellään metsäpalojen ja niiden sammutuksen vaikutuksia palaneen alueen maaperään ja biodiversiteettiin.

### 3.1 Maaperän muutokset

Metsäpalot aiheuttavat fysikaalisia, kemiallisia ja biologisia muutoksia maaperään, jotka vaikuttavat edelleen alueen hydrologiaan. Palon vaikutukset maaperän koostumukseen ja ominaisuuksiin eivät ole aina samanlaisia, vaan riippuvat muun muassa maaperän ominaisuuksista, kasvillisuudesta sekä palon intensiteetistä ja kestosta (Certini, 2005). Voimakkaampi palo lämmittää maaperää tyypillisesti enemmän, jolloin maaperän ominaisuudet muuttuvat enemmän kuin pienen palon myötä (Agbeshie *et al.*, 2022).

Voimakas metsäpalo muuttaa maaperän fysikaalisia ominaisuuksia merkittävästi. Maaperän sisältämä orgaaninen aines palaa, jolloin maa-aineksen tiheys kasvaa ja rakenne muuttuu epävakaammaksi (Agbeshie *et al.*, 2022). Maaperän rakenteen muuttuminen ja kasvillisuuden poistuminen palossa altistavat pintamaan voimakkaammalle eroosiolle (Santín & Doerr, 2016). Tällöin tuuli ja sade pääsevät kuluttamaan maaperää ja kuljettamaan maa-ainesta pois alueelta.

Maaperä muuttuu palon myötä hydrofobisemmaksi, kun orgaanisten yhdisteiden rakenne muuttuu kuumuuden vuoksi. Tällöin maan vedenläpäisevyys heikkenee ja veden imeytyminen maahan vähenee. Tämä muuttaa veden hydrologista kiertoa lisäämällä pintavalunnan määrää. (Agbeshie *et al.*, 2022) Myös tuhka voi muodostaa maan pinnalle läpäisemättömän kerroksen, joka vähentää veden imeytymistä maahan (Banton *et al.*, 2025). Valunnan lisääntyminen lisää myös eroosiota, kun maan pinnalla virtaava vesi kuljettaa maa-ainesta mukanaan vesistöihin.

Metsäpalo muuttaa maaperässä olevien ravinteiden määrää ja ravinnetasapainoa. Palossa muodostuva tuhka sisältää paljon ravinteita, joten sen laskeutuminen maahan lisää maaperässä olevien ravinteiden määrää. Ravinteita kuitenkin poistuu maaperän lämmetessä, sillä ne voivat haihtua tai hapettua. Eri aineiden höyrystymislämpötilat eroavat toisistaan, joten ravinteiden haihtumisherkkyys vaihtelee. (Agbeshie *et al.*, 2022) Pohjoisissa metsissä metsäpalon vaikutus maaperän sisältämiin ravinteisiin on suurempi kuin lämpimämmillä alueilla (Zhou *et al.*, 2025).

Ravinteiden määrän muutokset riippuvat palon ja maaperän ominaisuuksista, ja vaihtelevat merkittävästi eri paloja tarkasteltaessa. Pohjoisissa metsissä eniten muuttuu tyypillisesti maa-ainekseen sitoutuneen hiilen määrä, sillä se palaa ja vapautuu ilmaan hiilidioksidina (Agbeshie *et al.*, 2022). Tämä muuttaa hiilen luonnollista kiertokulkua ja nopeuttaa ilmastonmuutosta. Hiiltä voi myös varastoitua maaperään palossa muodostuvana biohiilenä, joka ei hajoa helposti, vaan säilyy maaperässä satoja vuosia (Santín & Doerr, 2016). Lisäksi kasvien kasvaminen takaisin paloalueelle sitoo ilmasta hiilidioksidia yhteyttämisen myötä. Metsäpalon vaikutukset hiilen kiertoon ovat siis monimutkaisia ja osittain tapauskohtaisia.

Typhen muutokset vaihtelevat eniten eri palojen välillä. Sitä vapautuu orgaanisen aineksen palaessa, mutta typpi voi myös haihtua melko helposti. Typhen määrä voi siis kasvaa, pysyä lähes muuttumattomana tai jopa laskea palon myötä riippuen eri reaktioiden suhteista toisiinsa. Fosforin pitoisuus yleensä kasvaa, sillä sitä päätyy maahan merkittäviä määriä tuhkan mukana, eikä se haihdu helposti. (Zhou *et al.*, 2025) Muutosta havaitaan myös muissa alkuaineissa, esimerkiksi rikin pitoisuus vähenee, kun taas kalsiumin ja magnesiumin pitoisuus voi pysyä samana tai nousta (Agbeshie *et al.*, 2022).

Maaperän rakenteen muutosten ja eroosion lisääntymisen myötä ravinteita poistuu maaperästä palon jälkeen liukenemalla veteen ja huuhtoutumalla sen mukana vesistöön (Agbeshie *et al.*, 2022). Eroosio voi myös lisätä fosforin pitoisuutta maaperässä, sillä fosforia voi vapautua kallioista. Pitkällä aikavälillä ravinteiden määrä maaperässä vähenee metsäpalon jälkeen kasvien kasvaessa takaisin palaneelle alueelle ja sitoessa niitä biomassansa. (Zhou *et al.*, 2025)

Kemiallisia muutoksia tarkasteltaessa on oleellista huomioida ravinteiden lisäksi maaperän pH-arvon muutos. Palossa muodostuva tuhka sisältää emäksisiä kationeja, joiden myötä maan pH-arvo nousee. Muutoksen suuruus riippuu muun muassa ympäristöolosuhteista, palon intensiteetistä ja maan alkuperäisestä pH-arvosta. pH-arvo vaikuttaa ravinteiden saatavuuteen maaperässä, sillä ravinteet voivat reagoida keskenään eri tavoin alhaisissa tai korkeissa pH-arvoissa, jolloin ne eivät ole kasveille saatavilla olevissa muodoissa. (Agbeshie *et al.*, 2022) Kokonaisuudessaan metsäpalo voi vaikuttaa maaperän ravinteisiin jopa vuosikymmenien ajan, ja vaikutukset vaihtelevat merkittävästi alueen ja palon ominaisuuksien mukaan.

Metsäpalo vaikuttaa myös maaperän biologisiin ominaisuuksiin. Maaperässä elää paljon eliöitä kuten mikro-organismeja, bakteereita ja selkärangattomia, jotka voivat tuhoutua tai vahingoittua palon kuumuuden vuoksi. Maaperän orgaanisen aineksen palaminen ja

kasvien kasvaminen takaisin palaneelle alueelle voivat myös muuttaa eliöiden elinolosuhteita merkittävästi, mikä vaikuttaa eliöstön lajikoostumukseen. (Agbeshie *et al.*, 2022) Valtaosa biologisista muutoksista, kuten ohuiden juurten, sienien ja bakteerien tuhoutuminen tapahtuu alle 150 °C lämpötilassa (Santín & Doerr, 2016). Monet mikrobit kuolevat kuitenkin jo alle 100 °C lämpötilassa (Dooley & Treseder, 2012). Maa johtaa melko heikosti lämpöä, joten vaikutukset ovat merkittävimpiä lähellä maan pintaa, eivätkä yleensä ulotu kovin syvälle (Santín & Doerr, 2016).

Voimakkuudeltaan vähäisemmissä paloissa vaikutukset maaperälle ovat lievempiä. Tällaiset palot nostavat maan pH-arvoa, ja maahan laskeutuva tuhka lisää saatavilla olevien ravinteiden määrää. Mikäli kasvit pääsevät kasvamaan nopeasti takaisin alueelle, maaperän ominaisuudet palaavat nopeasti ennalleen tai voivat jopa parantua. (Certini, 2005) Tätä hyödynnetään kulotuksessa, jossa metsää poltetaan hallitusti. Kulotus lisää saatavilla olevien ravinteiden määrää ja parantaa siten uusien kasvien elinolosuhteita (Santín & Doerr, 2016). Kulotus myös vähentää palosta maaperälle aiheutuvia haittoja, sillä siinä maaperän lämpötila ei nouse yhtä korkeaksi hallitsemattomaan paloon verrattuna (Agbeshie *et al.*, 2022). Hallitulla kulotuksella voidaan vähentää palavan aineksen määrää ja siten pienentää suuren palon todennäköisyyttä, sekä lisätä maaperän ravinnepitoisuutta ja uudistaa kasvillisuutta (Santín & Doerr, 2016).

### 3.2 Biodiversiteetin muutokset

Kasvillisuuden palaminen aiheuttaa merkittäviä muutoksia metsän biodiversiteetille. Palot voivat tuhota uhanalaisten lajien elinympäristöjä tai aiheuttaa tappioita talousmetsissä. Toisaalta metsäpaloilla on tärkeä rooli metsien luonnollisessa uudistamisessa ja lajien monimuotoisuuden ylläpidossa (Arshad *et al.*, 2022). Metsäpalon muodostamista elinympäristöistä riippuvaisia lajeja pyritään pitämään elinvoimaisina kulotusten avulla (Suomen ympäristökeskus, 2026).

Metsäpalo voi edetä pintapalona, jossa metsän pohja- ja kenttäkerroksen ainekset palaavat, tai latvapalona, jossa palavana aineksena ovat puiden latvukset. Suomessa yleisempiä ovat pintapalot, sillä latvapalon syntyminen vaatii riittävän kuivat ja tuuliset olosuhteet sekä puuston tiheyden ja kerroksellisuuden. (Metsäkeskus, 2022) Suurissa paloissa voivat palaa sekä latva- että kenttäkerros. Palon voimakkuudella ja tyyppillä on merkittävä vaikutus sen aiheuttamiin biodiversiteetin muutoksiin, sillä palanut kasvillisuus on suurin biodiversiteettiä muuttava tekijä.

Metsäpalot aiheuttavat sekä kasvien että eliöiden kuolemia, ja voivat uhata harvinaisten lajien selviytymistä paikallisesti. Tämä riski on erityisen suuri silloin, kun palo on laaja tai

toistuu usein. Suorassa vaarassa ovat erityisesti hitaasti liikkuvat eliöt, jotka eivät pysty pakenemaan paloa riittävän nopeasti. Liikkumiskykyiset eliöt voivat paeta paloa uusille alueille, mikä muuttaa ekosysteemien lajikoostumusta. (Plumanns-Pouton *et al.*, 2025)

Metsäpalon jälkeen alueelle kasvaa yleensä ensimmäisenä heinäkasveja ja muuta matalaa kasvillisuutta, joka vesoo ja leviää nopeasti. Kasvillisuuden tulee kestää suoraa auringonvaloa, sillä puiden tuhoutuminen vähentää alueelle syntyvien varjojen määrää. Myöhemmin palaneelle alueella palaavat puut, joiden kasvaminen vie enemmän aikaa. Näin ollen biomassaa kertyy ajan myötä takaisin metsään. Kasvillisuuden palautumiseen vaikuttaa muun muassa ennen paloa vallinnut kasvillisuus ja sen monipuolisuus, siementen ja ravinteiden saatavuus sekä maaperässä tapahtuneet muutokset. (Arshad *et al.*, 2022)

Metsäpalot ovat osa metsien luontaista elinkiertoa. Pohjoisissa metsissä elää monia kasvi- ja eläinlajeja, jotka ovat erikoistuneet elämään palaneessa metsässä. Osa kasveista esimerkiksi itää vain metsäpalon jälkeen (Zhou *et al.*, 2025). Tyypillisiä palaneessa metsässä menestyviä lajeja ovat erilaiset kovakuoriaiset ja käävät, jotka elävät palaneiden ja lahoavien puiden rungoilla (Tehomaa, 2021). Monet metsäpaloista riippuvaisista lajeista ovat uhanalaistuneet suunnitelmallisen metsänhoidon ja palojen tehokkaan sammutuksen vuoksi, sillä palaneita alueita syntyy nykyään vähemmän kuin luonnontilaisissa metsissä. Tämän vuoksi uhanalaisia lajeja pyritään pitämään elinvoimaisina hallituilla poltoilla, joissa syntyy lajeille soveltuvia metsätyppejä. (Suomen ympäristökeskus, 2026)

Palonestoaineet ja sammutusaineet voivat aiheuttaa haittaa eliöille. Vaikutukset vaihtelevat paljon eri lajien välillä ja riippuvat myös muista olosuhteista. Todennäköisyyttä eliöiden kuolemiin voidaan arvioida aineiden haitalliseksi tunnettujen pitoisuuksien avulla. Vaikka pitoisuudet olisivat kuolettavia alhaisemmat, eliöille voi aiheutua kroonisia haittoja biokertymisen myötä. (Gao *et al.*, 2025)

Palonestoaineiden sisältämä ammoniumfosfaatti nostaa maaperän typpi- ja fosforipitoisuuksia ja voi siten toimia lannoitteena. Aineen keskimääräisellä levitysmäärällä ympäristöön päätyy 337 kg typpeä ja 94 kg fosforia hehtaaria kohden (Gao & DeLuca, 2021). Suurina pitoisuuksina typen ja fosforin lisäys voi aiheuttaa haittaa kasvillisuudelle, sillä se muuttaa maaperän ravinnetasapainoa. Joidenkin lajien, kuten mäntyjen kuolleisuus lisääntyy palonestoaineen käytön myötä, mutta toiset lajit voivat menestyä aiempaa paremmin. Ravinteiden pitoisuuksien muutoksen on havaittu kestävän yli 10 vuotta, eli palonestoaineilla voi olla pitkäkestoisia vaikutuksia elinympäristöille. (Gao *et al.*, 2025)

Sammutusaineiden vaikutukset maaperään ja kasvillisuuteen vaihtelevat eri aineiden ja tarkasteltavien lajien välillä. Niiden käyttö voi vaikuttaa muun muassa maaperän ravinteiden määrään ja saatavuuteen, mikrobikoostumukseen sekä eliöiden elinolosuhteisiin. Vaikutukset voivat olla positiivisia tai negatiivisia, ja jokainen aine vaikuttaa eri lajeihin eri tavalla, minkä vuoksi vaikutusten arviointi kokonaisuudessaan on haastavaa. Kaikkia aineiden ympäristövaikutuksia ei myöskään tunneta kunnolla niiden vaihtelevuuden vuoksi. (Gao *et al.*, 2025)

## 4 VAIKUTUKSET PINTAVESIIN

Tässä luvussa käsitellään metsäpalon aiheuttamia muutoksia paloalueen hydrologisiin ominaisuuksiin ja valunnan määrään. Luvussa tarkastellaan myös palon jälkeen pintavesiin kulkeutuvia aineita sekä niiden vaikutuksia vesistöjen tilaan ja veden hyödyntämiseen talousvedentuotannossa.

### 4.1 Aineiden kulkeutuminen vesistöihin

Vesistöihin voi päätyä metsäpalossa vapautuneita aineita suorana laskeumana tai epäsuoraan valunnan mukana. Etenkin palossa muodostunutta tuhkaa voi laskeutua ilmasta suoraan vesistöön, jolloin tuhkan sisältämät ravinteet ja haitta-aineet päätyvät veteen (Agbeshie *et al.*, 2022). Myös palon sammuttamiseen käytettyjä aineita voi päätyä veteen suorana laskeumana, mikäli aineita levitetään vahingossa vesistöön (USDA, 2012). Tämä on kuitenkin melko epätodennäköistä, joten sammutusaineita päätyy vesistöön lähinnä valuman mukana maalta.

Pohjois-Amerikassa käytettäviä palonestoaineita voi päätyä vesistöön suoraan ilmalevityksessä. Tätä pyritään välttämään noudattamalla 90 metrin suojaetäisyyttä, jota lähemmäs vesistöjä ainetta ei levitetä (USDA, 2012). Suojaetäisyys ei välttämättä toteudu pienille vesistöille, sillä sen noudattaminen riippuu lentäjän kyvystä havaita vesistö lentokorkeudelta. Suuria määriä palonestoainetta voi päätyä vesistöihin myös onnettomuuden yhteydessä. (Anderson & Prosser, 2023)

Suoran laskeuman ohella aineita kulkeutuu vesistöihin myös maa-alueilta valunnan mukana. Metsäpalo muuttaa alueen hydrologisia ominaisuuksia merkittävästi, sillä kasvillisuuden palaminen jättää metsän maaperän paljaaksi. Tällöin kasvillisuus ei sido vettä normaaliin tapaan, vaan pintavalunta lisääntyy. Vesi pääsee myös etenemään nopeammin kohti vesistöä paljaalla maanpinnalla. Pintavaluntana vesistöön päätyvän veden määrään vaikuttavat keskeisesti valuma-alueen koko ja ominaisuudet, kuten kaltevuus. Lisäksi palon jälkeisillä sääolosuhteilla, kuten sateisuudella, on merkittävä vaikutus valunnan muodostumiseen. (Basso *et al.*, 2021)

Myös maaperän muutokset vaikuttavat veden kulkuun palaneella alueella. Veden imeytyminen maaperään vähenee tiiviin tuhkeroksen ja maaperän hydrofobisuuden lisääntymisen myötä. Tällöin suurempi osa maahan tulevasta vedestä siirtyy vesistöön pintavaluntana, jolloin valunnan määrä kasvaa ja sen hetkelliset huippuarvot voivat olla

huomattavasti suurempia kuin ennen paloa. (Basso *et al.*, 2021) Pintavalunnan ohella vettä kulkeutuu järviin valuma-alueen puroja ja jokia pitkin.

Valuma on suurimmillaan tyypillisesti 1–2 vuoden kuluttua palosta, ja muutos on havaittavissa 2–6 vuoden ajan palon jälkeen. Alueen hydrologisten ominaisuuksien palaaminen normaalille tasolle riippuu merkittävästi palon voimakkuudesta ja toistuvuudesta niin, että voimakkaammasta tai usein toistuvasta palosta palautuminen kestää pidempään. (Banton *et al.*, 2025)

Metsäpalojen sammutuksessa käytettävä vesi voi lisätä valuntaa hetkellisesti, mikäli vettä päätyy paljon maan pinnalle, eikä se imeydy maaperään. Maahan päätyvän veden osuus sammutuksessa käytettävästä vedestä vaihtelee, sillä etenkin voimakkaiden palojen yhteydessä suuri osa vedestä voi haihtua jo ilmassa kuumuuden vuoksi (Plucinski *et al.*, 2017).

Valunnan lisääntyminen on merkittävää vesistöjen kannalta, sillä veden mukana vesistöihin kulkeutuu maalta esimerkiksi palossa vapautuneita ravinteita, kiintoainesta sekä sammutusaineita. Palon jälkeisen valunnan määrä voi lisääntyä tulevina vuosina ilmastomuutoksen aiheuttaman sateiden lisääntymisen ja rankkasateiden yleistymisen myötä (Basso *et al.*, 2021). Tällöin metsäpalo aiheuttama vesistökuormitus voi kasvaa nykyistä suuremmaksi.

## 4.2 Pintavesien kemialliset ja biologiset muutokset

Vesistöjen kannalta merkittävä metsäpalo seuraus on lisääntynyt ravinnekuormitus. Palossa vapautuneita ravinteita kulkeutuu valuma-alueelta vesistöön pintavalunnan mukana, jolloin esimerkiksi typen ja fosforin pitoisuuksien on havaittu kasvavan vesistöissä (Basso *et al.*, 2021). Typen vaikutus vesistössä ei yleensä ole kovin pitkäaikainen, sillä se sekoittuu veteen, huuhtoutuu eteenpäin vesistössä ja sitoutuu kasvien biomassaan nopeasti (Bladon *et al.*, 2014). Täten typen pitoisuus ei ole pitkään koholla, vaikka se nousisi hetkellisesti korkeaksi.

Fosforin määrän vesistöissä on havaittu kasvavan sateiden yhteydessä, kun valuma kasvaa hetkellisesti (Basso *et al.*, 2021). Tämä osoittaa, että fosforia kulkeutuu vesistöön maalta veden mukana. Fosforin vaikutus vesistössä on usein pitkäkestoisempi, sillä fosforia voi kertyä vesistön pohjasedimentteihin ja vapautua sieltä myöhemmin veteen aiheuttaen järven sisäistä kuormitusta (Bladon *et al.*, 2014).

Ravinteiden määrää vesistössä lisää myös palonestoaineiden käyttö. Aineet koostuvat usein ammoniumfosfaatista, joka sisältää typpeä ja fosforia. Palonestoaineen on havaittu huuhtoutuvan maalta vesistöihin yli kuukauden ajan aineen levityksen jälkeen

(Gao & DeLuca, 2021). Ravinnetasapainon muutosten lisäksi ammoniumfosfaatti nostaa veden pH-arvoa. Vaikutuksen suuruus riippuu veden alkuperäisestä pH-arvosta ja koivuudesta. (Anderson & Prosser, 2023)

Typen ja fosforin saatavuus rajoittaa usein vesiekosysteemien perustuotantoa, eli vesikasvillisuuden ja levien kasvua. Näiden ravinteiden lisääntynyt saatavuus aiheuttaa vesistöissä rehevöitymistä, kun kasvien ja levien kasvu lisääntyy. Perustuotannon lisääntymisen myötä myös kasveja ravintonaan käyttävien eliöiden määrä voi lisääntyä. Rehevöityminen heikentää pitkällä aikavälillä vesistön ekologista tilaa ja voi aiheuttaa happikatoa sekä eliöiden kuolemia. Rehevöityminen lisää myös myrkyllisten kukintojen kuten sinilevän esiintymistä, millä on haitallisia vaikutuksia vesiekosysteemiin sekä vesistön virkistyskäyttöön. (Mansilha *et al.*, 2020)

Rehevöitymisen vaikutus voi olla erityisen suuri pohjoisten alueiden karuissa vesistöissä, joissa ravinteita on luonnostaan vähän, sillä ravinteiden määrän muutos suhteessa alkutilanteeseen on suurempi kuin ennestään runsasravinteisissa järvissä. Karujen järvien ekosysteemi voi myös olla herkempi rehevöitymisen aiheuttamille muutoksille, sillä karuissa järvissä elävät lajit ovat sopeutuneet kyseisiin olosuhteisiin. Rehevöityminen voi siis muuttaa vesiekosysteemin ravintoverkkoa ja lajikoostumusta merkittävästi. (Jensen *et al.*, 2020)

Vesistöihin kulkeutuu valuman mukana myös kiintoainetta. Kiintoaine voi koostua esimerkiksi kasvien osista tai maa-aineksesta. Basso *et al.* (2021) tutkimuksessa veden kiintoainespitoisuus nelinkertaistui paloa edeltäneestä pitoisuudesta. Kiintoaineen määrän muutosten havaittiin olevan yhteydessä valunnan määrään, eli valunnan kasvaessa esimerkiksi sateiden yhteydessä myös vesistöön päätyvän kiintoaineen määrä kasvoi (Basso *et al.*, 2021).

Kaikki kiintoaines ei poistu vesistöistä, vaan sitä voi kerääntyä uoman reunoille sedimentteihin, joissa se voi säilyä satoja vuosia. Aineksen kertyminen voi vaikuttaa uoman virtausnopeuteen tai muotoon. Tämän lisäksi sedimentti voi lähteä liikkeelle esimerkiksi rankkasateen yhteydessä, jolloin kiintoaines huuhtoutuu alapuolisiin vesistöihin ja vaikuttaa niiden vedenlaatuun. (Bladon *et al.*, 2014) Kiintoaines voi siis vaikuttaa vesistön tilaan vielä pitkän ajan kuluttua palosta.

Metsäpalojen on havaittu lisäävän veden sameutta merkittävästi (Banton *et al.*, 2025). Syynä on vesistöihin huuhtoutuva kiintoaine ja muut partikkelit. Erityisesti hienoaines lisää sameutta, sillä se laskeutuu hitaasti suuren orgaanisen aineen pitoisuuden ja huokoisuuden vuoksi. (Bladon *et al.*, 2014) Merkittävä tekijä sameuden lisääntymisessä on

erosio, sillä se lisää maaperästä irtoavien partikkelien määrää, jotka pääsevät kulkeutumaan veden mukana vesistöihin (Banton *et al.*, 2025).

Lisääntynyt sameus voi aiheuttaa haittaa vesieliöille, sillä se estää valon pääsyä veteen. Tämä heikentää vesikasvien yhteytyskykyä ja siten vähentää perustuotantoa sekä ravintoketjussa olevan ravinnon määrää. Sameus vaikuttaa eri eliölajeihin eri tavoilla ja voi siten muuttaa ekosysteemin lajikoostumusta. Esimerkiksi osa kaloista saalistaa näköaistinsa avulla, joten vähäisempi valo ja sameus voi häiritä niiden ravinnonsaantia. Toisaalta joillekin lajeille sameus voi antaa suojaa saalistajia vastaan. Sameus voi siis muuttaa vesiekosysteemin toimintaa useilla eri tavoilla. (Lunt & Smee, 2020)

Jos vesistön vettä hyödynnetään talousvedentuotannossa raakavetenä, palon myötä lisääntynyt sameus ja orgaanisen aineksen pitoisuus voivat lisätä vedenpuhdistuksen kustannuksia ja monimutkaistaa puhdistukseen tarvittavaa prosessia. Vedenpuhdistusprosessin tehokkuuden on oltava riittävä lisääntyneen sameuden poistamiseksi, ja esimerkiksi flokkulaation ja suodatuksen tarve kasvaa. Sameus voi myös vähentää desinfiointin tehokkuutta. Talousveden laadun varmistamiseksi on tärkeää seurata raakaveden ja valmiin talousveden laatua jatkuvasti, jotta voidaan varmistaa puhdistusprosessin riittävä tehokkuus raakaveden ominaisuuksien muuttuessa. (Banton *et al.*, 2025)

Raskasmetalleja kertyy metsiin ajan myötä, ja niitä vapautuu etenkin vanhoista metsistä biomassan palaessa. Raskasmetallit kulkeutuvat tuhkan mukana sedimentteihin, joiden mukana ne huuhtoutuvat edelleen vesistöihin. Tällöin raskasmetallien pitoisuudet vesistöissä voivat kasvaa moninkertaisiksi normaalitilaan verrattuna. Metsäpalo voi myös muuttaa metalli-ionien rakennetta ja vaikuttaa niiden biosaataavuuteen. (Bladon *et al.*, 2014) Raskasmetallien ympäristövaikutukset vaihtelevat eri metallien ja tarkasteltavien kohteiden välillä, ja voivat olla mitä tahansa merkityksettömien ja myrkyllisyyden väliltä (Mansilha *et al.*, 2020).

Myös raskasmetallit voivat aiheuttaa haasteita talousvedentuotannossa. Erityisesti saiteiden ja myrskyjen yhteydessä raskasmetallien pitoisuudet voivat nousta haitallisen korkeiksi palon valuma-alueella sijaitsevalla vedenottamolla. Raskasmetalleja voi myös kertyä kaloihin haitallisia määriä metallien rikastuessa ravintoketjussa, mikä estää kalojen käytön ravintona. (Bladon *et al.*, 2014)

Metsäpaloissa vapautuu PAH-yhdisteitä eli polysyklisiä aromaattisia hiilivetyjä, jotka ovat myrkyllisiä ja karsinogeenisiä ihmisille ja muille eliöille. PAH-yhdisteitä voi muodostua kasvillisuuden epätäydellisessä palamisessa tai maaperän orgaanisen aineksen palaessa (Mansilha *et al.*, 2020). PAH-yhdisteet päätyvät tuhkaan ja sen mukana maahan.

Tuulen ja eroosion kuluttaessa maata PAH-yhdisteet kulkeutuvat lähialueille ja saastuttavat maaperää myös paloalueen ympärillä. Tällöin palaneella alueella korkeaksi nousut PAH-yhdisteiden pitoisuus laskee yhdisteiden kulkeutuessa kauemmas. PAH-yhdisteet voivat myös hajota ajan myötä. (Rao & Parsai, 2023)

Maaperästä PAH-yhdisteet kulkeutuvat vesistöihin valuman mukana etenkin rankkasateiden yhteydessä, ja voivat kertyä pohjasedimentteihin. Korkeita pitoisuuksia on havaittu myös merenpohjan sedimenteissä alueilla, joille laskevan joen valuma-alueella metsäpalo on vaikuttanut. Mikäli PAH-yhdisteitä päätyy talousvedentuotannossa käytettävään pinta- tai pohjaveteen erityisen paljon, kaikki niistä eivät välttämättä poistu talousvedenpuhdistamolla. Tällöin ihmiset altistuvat yhdisteille veden kautta, minkä seurauksena voi olla terveyshaittoja, kuten syöpää. Yhdisteet voivat aiheuttaa haittaa myös kertymällä ravintona käytettäviin kasveihin pellon maaperästä. (Rao & Parsai, 2023)

Vesistön koko vaikuttaa merkittävästi kemiallisten muutosten voimakkuuteen ja keston. Suuremmissa järvissä veteen päätyneiden aineiden pitoisuudet laimenevat nopeasti veden sekoittuessa. Täten vaikutukset suuressa järvessä ovat rajallisia, vaikka aineiden pitoisuudet järveen laskevassa joessa olisivat suuria. Vaikutusten jatkuminen järven alajuoksulle ja eteenpäin vesistöissä on siis epätodennäköistä, sillä järvi tasaa vedenlaatua. Pienissä vesistöissä parametrit kuten sameus tai ravinteiden määrä voivat kasvaa huomattavasti enemmän, kun pitoisuudet eivät laimene yhtä tehokkaasti kuin suurempaan vesimäärään. (Basso *et al.*, 2021)

### **4.3 Sammutusaineiden vaikutukset vesiekosysteemeihin**

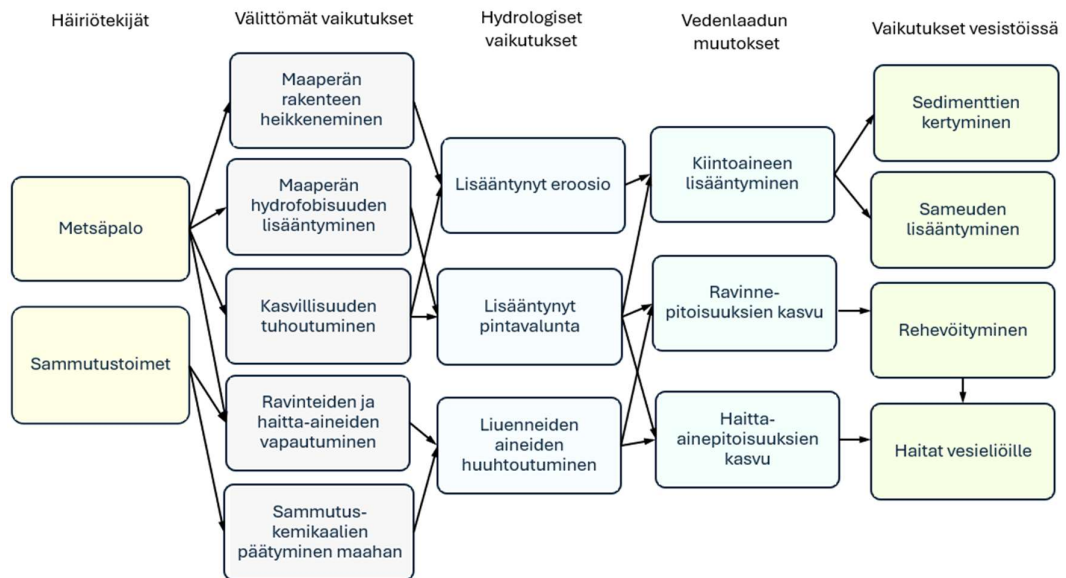
Sammutusaineet aiheuttavat ympäristölle monenlaisia haittoja, ja vesieliöt ovat usein niille herkempiä kuin maalla elävät. Vaikutusten arvioinnissa haasteena ovat eri aineiden erilaiset vaikutukset vesistöissä. Yleisiä vaikutuksia ovat esimerkiksi kalakuolemat sekä haitat leville ja planktonille. (Gao *et al.*, 2025) Sammutuskemikaalien haitat tulee ottaa huomioon aineiden valinnassa ja niitä käytettäessä, jotta ympäristölle aiheutuvat haitat ovat mahdollisimman vähäisiä.

Sammutukseen käytettävät aineet vaikuttavat eliöihin eri tavoilla riippuen aineen ja tarkasteltavan lajin ominaisuuksista. Esimerkiksi geeliä muodostava Eco-gel voi aiheuttaa kuolleisuutta isovesikirpuissa, kun eliöt jäävät jumiin veden pinnalle muodostuvaan geeliin. Haittavaikutus voi olla myös kemiallinen, esimerkiksi ammoniumfosfaattipohjainen palonestoaine LC95A muodostaa vedessä ammoniakkia ja nostaa pH-arvoa, mikä on haitallista kaloille. (Anderson & Prosser, 2023) Sammutusaineet voivat siis aiheuttaa eliöille haittoja fysikaalisten tai kemiallisten ominaisuuksiensa vuoksi.

Vesieliöille erityisen haitallinen sammutusvaahdoissa käytetty ainesosa ovat tensidit, jotka pienentävät veden pintajännitystä ja muodostavat vaahdon. Eliöihin päätyessään tensidit muuttavat solukalvon toimintaa ja häiritsevät hapen pääsyä solujen sisään. (Anderson & Prosser, 2023) Sammutusaineissa tyypillisesti käytettävät tensidit ovat aerobisissa oloissa biohajoavia, mutta anaerobisissa olosuhteissa, kuten järven pohjassa hajoaminen on huomattavasti hitaampaa. (García *et al.*, 2009) Sammutusaineita käytettäessä vesistöön päätyvät tensidit voivat siis aiheuttaa akuutteja haittoja vesieliöille, mutta hajoavat yleensä nopeasti, jolloin aineiden pitoisuudet eivät pysy korkeina pitkään (Könnecker *et al.*, 2011).

Vesistön ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi sammutusaineiden aiheuttamien haittojen vakavuuteen. Suurissa järvissä haitat ovat vähäisempiä, sillä kemikaalit laimenevat suuressa vesimäärässä hyvin pieniksi pitoisuuksiksi. Myös virtausnopeus ja suurempi veden vaihtuvuus nopeuttavat sammutusaineen pitoisuuden pienenemistä ja vähentävät aineiden aiheuttamia haittoja eliöille. Kaikkein suurimpia vaikutukset ovat pienille järville, joissa veden vaihtuvuus on hidasta. (Anderson & Prosser, 2023)

Sammutusaineet ovat siis monille vesieliöille haitallisia, mutta niiden vaikutukset riippuvat merkittävästi muun muassa vesistöön päätyvästä pitoisuudesta, aineen koostumuksesta, tarkasteltavasta lajista ja vesistön ominaisuuksista (Könnecker *et al.*, 2011; Anderson & Prosser, 2023). Vaikutusten määrittäminen ei siis ole yksiselitteistä, vaan riippuu monesta tekijästä, mikä vaikeuttaa niiden arviointia. Vaikutuksia vähentää metsäpalon sammutuksen kertaluonteisuus ja sammutusaineiden biohajoavuus, jolloin altistus ei ole pitkäaikaista (Anderson & Prosser, 2023). Kaikkia sammutusaineiden aiheuttamia haittoja ei välttämättä tunneta vielä, sillä etenkin pitkäaikaisia vaikutuksia eliöille on tutkittu melko vähän (Gao *et al.*, 2025). Kuvassa 2 esitetään yhteenveto metsäpalojen pintavesiin kohdistuvista vaikutuksista ja vaikutusten syntymekanismit.



**Kuva 2: Metsäpalojen ja sammutustoimien vaikutukset pintavesille ja vaikutusten muodostuminen**

Kuvan 2 mukaisesti metsäpalojen ja niiden sammutuksen aiheuttamat vaikutusketjut ovat monimutkaisia. Metsäpalot aiheuttavat välittömiä vaikutuksia pääasiassa maaperälle ja kasvillisuudelle sekä vapauttavat kasvillisuuteen sitoutuneita aineita, kuten ravinteita ja raskasmetalleja. Palon seurauksena alueen hydrologiset ominaisuudet muuttuvat, jolloin pintavalunnan määrää ja eroosio lisääntyvät. Tällöin vesistöihin huuhtoutuu paloa edeltävään aikaan verrattuna enemmän kiintoainetta, ravinteita ja haitta-aineita, jotka heikentävät vedenlaatua. Seurauksena voi olla esimerkiksi vesistön rehevöityminen tai vesieläöille aiheutuvat haitat.

## 5 VAIKUTUKSET POHJAVETEEN

Tässä luvussa tarkastellaan metsäpalon vaikutuksia pohjaveden muodostumiseen ja laatuun sekä pohjaveden hyödyntämiseen talousvedentuotannossa.

### 5.1 Pohjaveden muodostumisen muutokset

Pohjavettä muodostuu veden imeytyessä maaperään. Maaperän vedenläpäisevyydellä on suuri vaikutus muodostuvan pohjaveden määrään, sillä vesi pääsee suotautumaan helpommin hyvin vettä johtavien, rakeisten maakerrosten läpi. Alueilla, joiden maaperä koostuu hiekasta tai sorasta jopa 30–60 % sadannasta imeytyy maahan ja muodostaa pohjavettä. Tämän vuoksi Suomessa merkittävimmät pohjavesiesiintymät ovat harjuissa, joiden maaperä johtaa hyvin vettä. Tiiviimmissä moreenimaissa suotautumisen osuus voi olla alle 10 % sadannasta, ja savimailla tai kallioalueilla pohjavettä ei välttämättä muodostu juuri lainkaan. Tällaisilla alueilla pintavaluntaa syntyy enemmän. (Suomen ympäristökeskus, 2022)

Metsäpalo voi vähentää muodostuvan pohjaveden määrää. Palossa maan pinnalle muodostunut tiivis tuhkerakkerros ja maaperän muuttuminen hydrofobisemmaksi voivat estää veden imeytymistä maahan ja täten vähentää pohjaveden muodostumista (Banton *et al.*, 2025). Tällöin imeytyvän veden määrä voi olla jopa 40 % normaalia pienempi palon jälkeisen vuoden aikana (Guzmán-Rojo *et al.*, 2025). Imeytyminen lisääntyy ajan kuluessa, mutta ei palaa paloa edeltäneelle tasolle useaan vuoteen. Kun pohjavettä muodostuu normaalitilannetta vähemmän, pohjavedenpinta voi laskea useiden vuosien ajaksi. (Banton *et al.*, 2025)

Pohjaveden määrän vähentyminen voi aiheuttaa haasteen talousveden riittävyydelle. Matalampi pohjavedenpinta voi vaikuttaa myös jokien ja järvien vedenkorkeuteen, sillä pohjavesi ja pintavesi ovat yhteydessä toisiinsa esimerkiksi rannoilla. Täten pohjavedenpinnan korkeus voi vaikuttaa myös pintaveden käyttöön raakavetenä. (Banton *et al.*, 2025)

Pohjaveden muodostuminen voi myös lisääntyä, mikäli evapotranspiraation eli kokonaishaihdunnan väheneminen kasvipeitteen poistumisen myötä on merkittävämpi tekijä kuin maaperän muutokset. Tällöin suurempi osuus sateesta pääsee maan pinnalle, mikä lisää maaperään imeytyvän veden määrää. (Banton *et al.*, 2025) La Pasta Cordeiro *et al.* (2025) tutkimuksen mukaan joissain tapauksissa muodostuvan pohjaveden määrä voi jopa kaksinkertaistua, jolloin myös pohjavedenpinta nousee. Tämä on mahdollista,

mikäli valunta on vähäistä maan muotojen vuoksi, suotautumisnopeus on korkea ja ilmasto-olosuhteet optimaaliset (La Pasta Cordeiro *et al.*, 2025). Metsäpalon vaikutukset pohjaveden määrään eivät siis ole yksiselitteisiä, vaan riippuvat useasta eri tekijästä, mikä tekee vaikutusten ennustamisesta haastavaa.

## 5.2 Pohjaveden laadun muutokset

Pohjaveden määrän lisäksi myös sen laatu voi muuttua metsäpalon myötä. Palossa vapautuneita aineita voi päästä kulkeutumaan pohjaveteen maaperään suotautuvan veden mukana. Erityisesti palon jälkeisten sateiden aikana maaperästä liukenee yhdisteitä veteen, kun veden määrä maan pinnalla ja maaperässä lisääntyy nopeasti. (Banton *et al.*, 2025) Myös metsäpalon sammutuksessa käytettyjä palonestoaineita ja veteen lisättäviä sammutusaineita voi kulkeutua pohjaveteen (Mansilha *et al.*, 2020).

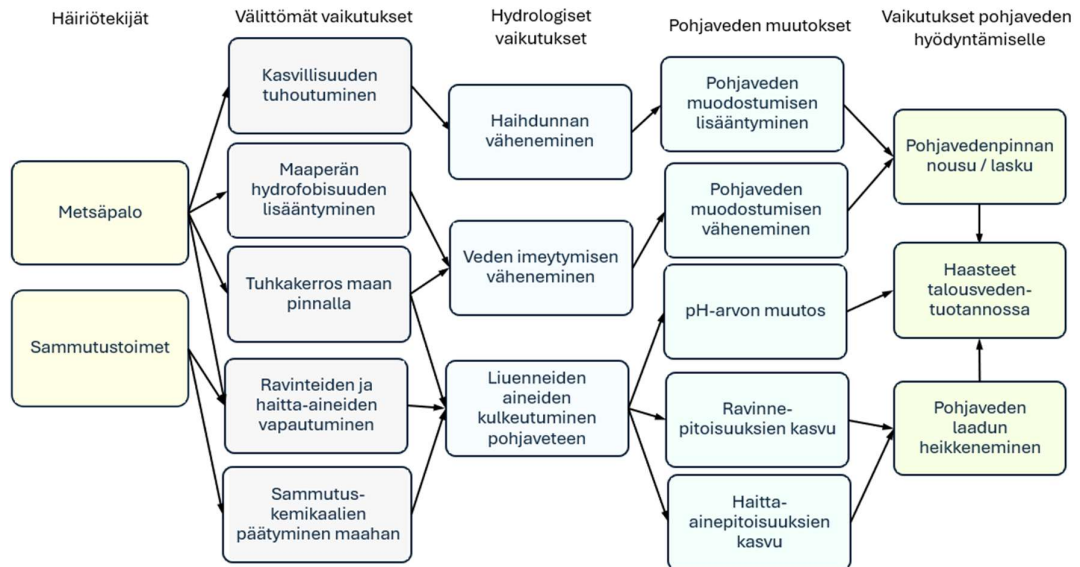
Maan pinnalle kertynyt tuhka ja palanut orgaaninen aines muuttavat imeytyvän veden kemiallisia ominaisuuksia. Tyypillisesti veden pH laskee ja sen sisältämien ionien määrä nousee (Banton *et al.*, 2025). Pohjaveden pH-arvossa on kuitenkin vaihtelua eri näytteiden välillä, ja muutosten arviointi etukäteen on haastavaa (Mansilha *et al.*, 2020). Jos vettä käytetään talousvetenä, pH-arvon muutos voi vaikuttaa vedenkäsittelyssä muun muassa desinfioinnin, koagulaation ja flokkulaation tehokkuuteen (Banton *et al.*, 2025).

Palossa muodostunut tuhka sisältää suuria määriä epäorgaanista typpeä ja fosforia liukenevassa muodossa (Banton *et al.*, 2025). Nämä ravinteet voivat päästä kulkeutumaan suotautuvan veden mukana pohjaveteen, jolloin veden ravinnepitoisuus voi nousta moninkertaiseksi normaalitilanteeseen verrattuna (Mansilha *et al.*, 2020). Myös sammutusaineiden sisältämiä ravinteita voi kulkeutua pohjaveteen, ja esimerkiksi palonestoaineen sisältämän typen on havaittu kulkeutuvan pohjaveteen nostaen veden typpipitoisuutta (Banton *et al.*, 2025).

Pohjaveteen voi kulkeutua myös muita liuenneita aineita, kuten metalleja, joista osa voi aiheuttaa vedessä terveydellisiä tai aistinvaraisia haittoja. Muun muassa rauta-, mangaani- ja kloridipitoisuuksien nouseminen voi aiheuttaa veteen väriä sekä maku- ja hajuhaittoja, mikä heikentää veden käyttökelpoisuutta talousvetenä. Terveydelle haitallisia aineita ovat esimerkiksi arseeni, kromi ja lyijy, jotka voivat aiheuttaa haittaa ihmisille joko akuutisti tai pidemmän altistuksen myötä. (Mansilha *et al.*, 2020) Näiden aineiden pitoisuuksia tulee seurata raakavedessä, joka on peräisin palolle altistuneelta alueelta sekä valmiissa talousvedessä, jotta voidaan varmistaa veden turvallisuus ja käyttömukavuus.

Pohjaveteen voi kulkeutua myös muita haitallisia aineita. Esimerkiksi PAH-yhdisteitä on havaittu pohjavedessä palon jälkeen normaalia enemmän. Niiden pitoisuus on kasvanut

erityisesti palon jälkeisten rankkasateiden aikana, eli yhdisteitä pääsee kulkeutumaan pohjaveteen sateen mukana vielä palon jälkeen. PAH-yhdisteet ovat karsinogeenisiä ja aiheuttavat merkittävää haittaa ihmisten terveydelle, mikäli niitä päätyy juomaveteen. (Mansilha *et al.*, 2020) Myös mikrobeja voi päästä pohjaveteen normaalia enemmän hydrologisten olosuhteiden ja maan rakenteen muutosten vuoksi (Banton *et al.*, 2025). Kuvassa 3 havainnollistetaan merkittävimpiä pohjaveteen kohdistuvia vaikutuksia ja vaikutusten syntymekanismeja.



**Kuva 3: Metsäpalojen ja sammutustoimien vaikutukset pohjaveteen ja vaikutusten muodostuminen**

Kuten pintavesiin, myös pohjaveteen kohdistuvien vaikutusten muodostumisketju on monimutkainen, mikä havaitaan kuvasta 3. Pohjavettä tarkasteltaessa on tärkeää huomioida sekä määrän että laadun muutokset. Muodostuvan pohjaveden määrä voi joko lisääntyä tai vähentyä riippuen kasvillisuudessa ja maaperässä tapahtuvien muutosten suhteesta toisiinsa. Pohjaveteen voi päästä kulkeutumaan aineita, kuten ravinteita tai haitta-aineita. Tällöin pohjaveden laatu voi heikentyä, mikä aiheuttaa haasteita talusvedentuotannossa.

Pohjaveteen päätyvän veden ja muiden aineiden määristä ei ole juurikaan tutkimustietoa, sillä tutkittujen valuma-alueiden määrä on hyvin rajallinen. Paikallisten muutosten määrittäminen on myös haastavaa etenkin suurempia valuma-alueita tarkasteltaessa, sillä pohjaveteen päätyneiden aineiden pitoisuudet laimenevat nopeasti pohjaveden sekoittumisen myötä. (Banton *et al.*, 2025) Suomessa metsäpalojen vaikutukset pohjaveteen ovat todennäköisesti vähäisiä palojen rajallisen laajuuden ja voimakkuuden vuoksi.

Liuenneiden aineiden tai haitta-aineiden pitoisuuksien nouseminen haitallisen korkeiksi talousvedessä on täten melko epätodennäköistä (Basso *et al.*, 2021).

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli selvittää, millaisia vaikutuksia metsäpalot ja niiden sammutus aiheuttavat pinta- ja pohjavesille. Veteen kohdistuvien vaikutusten selvittämiseksi työssä tarkasteltiin myös metsäpalojen vaikutuksia maaperän ominaisuuksiin ja biodiversiteettiin. Ympäristövaikutusten lisäksi työssä tarkasteltiin ilmastonmuutoksen vaikutusta metsäpaloihin, sillä ilmastonmuutoksen vaikutus metsäpalojen määrään ja laajuuteen voi olla tulevaisuudessa merkittävä.

Ilmastonmuutoksen ennustetaan lisäävän metsäpalojen esiintymistä huomattavasti, kun paloille altistavat sääolosuhteet, eli kuivuus ja kuumuus yleistyvät. Viimeisimpinä vuosikymmeninä on jo havaittu metsäpaloisuuden pidentyneen merkittävästi pohjoisilla alueilla, ja kehitys tulee todennäköisesti jatkumaan samansuuntaisena, jos maapallon keskilämpötilan nousu jatkuu. Palojen määrän ja laajuuden kasvaessa myös niiden sosiaaliset, taloudelliset ja ekologiset vaikutukset lisääntyvät.

Metsäpalojen ympäristövaikutusten arviointi on haastavaa, sillä vaikutukset vaihtelevat tapauskohtaisesti palon ja alueen erilaisten ominaisuuksien myötä. Näin ollen palon seuraukset eivät välttämättä vastaa aiemmin havaittuja vaikutuksia. Ympäristövaikutuksia tarkastelevan tutkimuksen haasteena on lähtötietojen saatavuus, esimerkiksi paloalueen vesistöjen vedenlaadusta ei välttämättä ole saatavilla tietoa ajalta ennen paloa, jolloin palon vaikutusten määrittäminen ei ole suoraviivaista.

Metsäpalon aiheuttamien vesistövaikutusten taustalla ovat usein palon myötä muuttuneet maaperän ominaisuudet. Tärkeä tekijä on pintavalunnan lisääntyminen, mikä johtuu maaperän rakenteen muuttumisesta hydrofobisemmaksi, jolloin maahan imeytyvän veden määrä vähenee. Maaperän rakenne muuttuu myös epävakaammaksi, jolloin siitä irtoaa kiintoainesta helpommin ja eroosio lisääntyy.

Metsäpalojen vesistövaikutukset muodostuvat enimmäkseen epäsuoran kuormituksen myötä, sillä suorat päästöt vesistöihin ovat vähäisiä. Epäsuoraa kuormitusta muodostuu pintavaluntana kulkevan veden kuljettaessa vesistöön palossa vapautuneita aineita, kuten ravinteita, haitta-aineita ja raskasmetalleja. Eroosion myötä maasta irtoaa enemmän kiintoainesta, joka lisää veden sameutta vesistöön kulkeutuessaan. Vesistöihin kulkeutuvat aineet heikentävät veden laatua ja voivat aiheuttaa muun muassa rehevöitymistä ja haittaa eliöille.

Pohjavedenpinta voi laskea metsäpalon seurauksena, mikäli vettä imeytyy maaperään paloa edeltävää määrää vähemmän. Joissain tapauksissa muodostuvan pohjaveden

määrä voi myös lisääntyä, kun kasvillisuus haihuttaa vähemmän vettä. Pohjaveteen voi päästä kulkeutumaan palossa vapautuneita aineita, kuten ravinteita tai haitta-aineita. Jos pohjavettä käytetään talousvedentuotannossa raakavetenä, tulee veden laadun muutokset ottaa huomioon vedenpuhdistusprosessin riittävyttä tarkasteltaessa. On melko epätodennäköistä, että metsäpalo aiheuttaisi merkittävää haittaa pohjaveden laadulle tai sen hyödyntämiselle Suomessa. Sen sijaan esimerkiksi USA:ssa tai Kanadassa, missä palot ovat huomattavasti voimakkaampia ja laajempia, vaikutukset pohjavedelle voivat olla merkittäviä.

Metsäpaloja voidaan sammuttaa epäsuorasti estämällä palon leviäminen uusille alueille rajoituslinjojen avulla. Palon rajaamiseen voidaan käyttää myös palonestoainetta, joka on käytössä laajalti Pohjois-Amerikassa. Palonestoaineet ovat koostumukseltaan lannoitteita, ja ne lisäävät vesistöön päätyessään veden ravinnepitoisuutta ja voivat aiheuttaa rehevöitymistä. Suorassa sammutuksessa käytetään yleisimmin vettä, johon voidaan lisätä sen sammutusominaisuuksia parantavia sammutusaineita. Sammutusaineita päätyy vesistöihin huuhtoutumalla maan pinnalta, ja ne voivat aiheuttaa akuutteja tai kroonisia haittoja vesieläimille, kuten kaloille.

Metsäpalojen ympäristövaikutusten vähentämisessä tärkein tekijä on palojen syttymisen ehkäisy, jota voidaan toteuttaa esimerkiksi lisäämällä tietoutta metsäpaloista. Toinen tärkeä tekijä on palojen tehokas sammutus, joka vähentää palaneen alueen laajuutta. Paloja ei kannata kuitenkaan vähentää liikaa, jotta palossa muodostuvista elinympäristöistä riippuvaiset kasvi- ja eläinlajit säilyvät elinvoimaisina. Vakavia paloja voidaan ehkäistä metsänhoidollisilla toimenpiteillä, kuten harvennuksella tai hallitulla kulotuksella, joilla vähennetään palavan aineksen määrää metsässä. Myös sammutusmenetelmien valinnalla voidaan vaikuttaa palon ympäristövaikutuksiin.

Metsäpalojen ja eri sammutusaineiden vaikutuksista vesistöille tarvittaisiin lisää tutkimustietoa, jotta niiden haitallisia vaikutuksia voitaisiin ehkäistä nykyistä paremmin. Tulevina vuosikymmeninä ilmastonmuutos tulee vaikuttamaan merkittävästi metsäpalojen esiintymiseen ja niiden aiheuttamien ympäristövaikutusten määrään lisäten painetta ymmärtää ja hallita metsäpaloja sekä niiden vaikutuksia kokonaisvaltaisesti.

## LÄHTEET

Agbeshie, A.A. *et al.* (2022) 'A review of the effects of forest fire on soil properties', *Journal of Forestry Research*, 33(5), s. 1419–1441. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01475-4>.

Anderson, J. & Prosser, R.S. (2023) 'Potential risk to aquatic biota from aerial application of firefighting water additives', *Environmental Pollution*, 316. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120651>.

Arshad, A., Azhar, A.A. & Anjali, K. (2022) 'Impact of Forest Fire on Forest Ecosystem', *J Agric Technol.*, s. 18–29. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/364756981\\_Impact\\_of\\_Forest\\_Fire\\_on\\_Forest\\_Ecosystem](https://www.researchgate.net/publication/364756981_Impact_of_Forest_Fire_on_Forest_Ecosystem)

Ateia, M. & Scheringer, M. (2024) 'From "forever chemicals" to fluorine-free alternatives', *Science*, 385(6706), s. 256–258. Saatavissa: <https://doi.org/10.1126/science.ado5019>.

Banton, O. *et al.* (2025) 'A Review of the Key Impacts of Deforestation and Wildfires on Water Resources with Regard to the Production of Drinking Water', *Hydrology*, 12(10), s. 271. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/hydrology12100271>.

Basso, M. *et al.* (2021) 'Potential Post-Fire Impacts on a Water Supply Reservoir: An Integrated Watershed-Reservoir Approach', *Frontiers in Environmental Science*, 9. Saatavissa: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.684703>.

Bladon, K.D. *et al.* (2014) 'Wildfire and the Future of Water Supply', *Environmental Science & Technology*, 48(16), s. 8936–8943. Saatavissa: <https://doi.org/10.1021/es500130g>.

Calvin, K. *et al.* (2023) *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee & J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland*. First. Edited by P. Arias *et al.* Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Saatavissa: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.

Certini, G. (2005) 'Effects of fire on properties of forest soils: a review', *Oecologia*, 143(1), s. 1–10. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8>.

Government of the Northwest Territories. (n.d.) *Wildfire science*. Saatavissa: <https://www.gov.nt.ca/ecc/en/services/wildfire-operations/wildfire-science> (Viitattu: 12.2.2026).

Dooley, S.R. & Treseder, K.K. (2012) 'The effect of fire on microbial biomass: a meta-analysis of field studies', *Biogeochemistry*, 109(1), s. 49–61. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9633-8>.

Ganteaume, A. *et al.* (2013) 'A Review of the Main Driving Factors of Forest Fire Ignition Over Europe', *Environmental Management*, 51(3), s. 651–662. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s00267-012-9961-z>.

Gao, J. *et al.* (2025) 'Advances and Environmental Impact Assessment of Forest Fire Extinguishing Agents', *Fire*, 8(11), s. 411. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/fire8110411>.

Gao, S. & DeLuca, T.H. (2021) 'Influence of fire retardant and pyrogenic carbon on microscale changes in soil nitrogen and phosphorus', *Biogeochemistry*, 152(1), s. 117–126. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s10533-020-00746-8>.

García, M.T. *et al.* (2009) 'Biodegradability and toxicity of sulphonate-based surfactants in aerobic and anaerobic aquatic environments', *Water Research*, 43(2), s. 295–302. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.10.016>.

Guzmán-Rojo, M. *et al.* (2025) 'Groundwater Vulnerability in the Aftermath of Wildfires at the El Sutó Spring Area: Model-Based Insights and the Proposal of a Post-Fire Vulnerability Index for Dry Tropical Forests', *Fire*, 8(3). Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/fire8030086>.

Helin, K. (2021) *Tulimyrskyn silmässä - Rajan kopterit tukevat metsäpalojen sammutustöitä, Rajamedia*. Saatavissa: <https://rajamedia.raja.fi/-/tulimyrskyn-silmassa-rajan-kopterit-tukevat-metsapalojen-sammutustoita> (Viitattu: 2.3.2026).

Ilmatieteen laitos (n.d.) *Maastopaloindeksi*, <https://www.ilmatieteenlaitos.fi>. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/maastopaloindeksi> (Viitattu: 16.2.2026).

Jensen, T.C. *et al.* (2020) 'Historical human impact on productivity and biodiversity in a subalpine oligotrophic lake in Scandinavia', *Journal of Paleolimnology*, 63(1), s. 1–20. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s10933-019-00100-5>.

Jones, M.W. *et al.* (2022) 'Global and Regional Trends and Drivers of Fire Under Climate Change', *Reviews of Geophysics*, 60(3). Saatavissa: <https://doi.org/10.1029/2020RG000726>.

Kal'avský, P. *et al.* (2019) 'The Efficiency of Aerial Firefighting in Varying Flying Conditions', *2019 International Conference on Military Technologies (ICMT)*. *2019 International Conference on Military Technologies (ICMT)*, s. 1–5. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/MILTECHS.2019.8870050>.

Könnecker, G. *et al.* (2011) 'Environmental properties and aquatic hazard assessment of anionic surfactants: Physico-chemical, environmental fate and ecotoxicity properties', *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 74(6), s. 1445–1460. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.04.015>.

La Pasta Cordeiro, M., Nunes, J.P. & Condesso de Melo, M.T. (2025) 'Impact of wildfires on spatial and temporal evolution of groundwater recharge in an Atlantic pine forest: An integrated approach using field, remote sensing and modeling.', *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 59, s. 102408. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102408>.

Lunt, J. & Smee, D.L. (2020) 'Turbidity alters estuarine biodiversity and species composition', *ICES Journal of Marine Science*, 77(1), s. 379–387. Saatavissa: <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz214>.

Luonnonvarakeskus (2026) *Maasto- ja metsäpalot vuonna 2025*, *Luonnonvarakeskus*. Saatavissa: <https://www.luke.fi/fi/luonnonvaratieto/tiedetta-ja-tietoa/metsatuhot/puustotuhot-2025/abiioottiset-puustotuhot-2025/maasto-ja-metsapalot-vuonna-2025> (Viitattu: 19.4.2026).

Mansilha, C. *et al.* (2020) 'Wildfire Effects on Groundwater Quality from Springs Connected to Small Public Supply Systems in a Peri-Urban Forest Area (Braga Region, NW Portugal)', *Water*, 12(4). Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/w12041146>.

Mänttari, J. (2022) *Maastopalojen maasammutustoiminnan konseptin muodostaminen pelastustoimessa. Laaja raportti*. Helsinki: Sisäministeriö.

Martinho, V.J.P.D. (2019) 'Estimating relationships between forest fires and greenhouse gas emissions: circular and cumulative effects or unidirectional causality?', *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(9), s. 581. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7770-z>.

Metsäkeskus (2022) *Tuli metsässä -sanasto*. Lahti: Suomen metsäkeskus. Saatavissa: <https://www.metsakeskus.fi/fi/avoin-metsa-ja-luontotieto/sanastot-ja-standardit/met-sasanasto/tuli-metsassa-sanasto> (Viitattu: 17.2.2026).

Parvar, Z., Saeidi, S. & Mirkarimi, S. (2024) 'Integrating meteorological and geospatial data for forest fire risk assessment', *Journal of Environmental Management*, 358, s. 120925. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120925>.

Perimeter Solutions (n.d.) *Fire Retardants*. Saatavissa: <https://www.perimeter-solutions.com/en/fire-safety-fire-retardants/> (Viitattu: 3.3.2026).

Plucinski, M.P., Sullivan, A.L. & Hurley, R.J. (2017) 'A methodology for comparing the relative effectiveness of suppressant enhancers designed for the direct attack of wild-fires', *Fire Safety Journal*, 87, s. 71–79. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.fire-saf.2016.12.005>.

Plumanns-Pouton, E. *et al.* (2025) 'The Mechanisms Through Which Fire Drives Population Change in Terrestrial Biota', *Global Change Biology*, 31(9), s. 70479. Saatavissa: <https://doi.org/10.1111/gcb.70479>.

Rao, J.N. & Parsai, T. (2023) 'Trends and patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in forest fire-affected soils and water mediums with implications on human health risk assessment', *Science of The Total Environment*, 905, s. 166682. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166682>.

Santín, C. & Doerr, S.H. (2016) 'Fire effects on soils: the human dimension', *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 371(1696). Saatavissa: <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0171>.

Suomen ympäristökeskus (2022) *Pohjaveden muodostuminen ja esiintyminen, Vesi.fi*. Saatavissa: <https://www.vesi.fi/vesitieto/pohjaveden-muodostuminen-ja-esiintyminen/> (Viitattu: 1.4.2026).

Suomen ympäristökeskus (2026) *Metsäluontotyypin uhanalaisuus, Ympäristö.fi*. Saatavissa: <https://www.ymparisto.fi/fi/luonto-vesistot-ja-meri/luonnon-monimuotoisuus/luontotyypin-monimuotoisuus/luontotyypin-uhanalaisuus/metsat> (Viitattu: 10.3.2026).

Tapio (2026) *Metsäpalojen torjunta*. Metsänhoidon suositukset. Saatavissa: <https://metsanhoitonsuosituksien.fi/fi/toimenpiteet/metsapalojen-torjunta> (Viitattu: 3.3.2026).

Tehomaa, O. (2021) *Poltettu metsä houkuttelee hyönteisiä ja kääpiä, Metsään-lehti*. Metsäkeskus. Saatavissa: <https://www.metsaan-lehti.fi/uutiset/luonto/poltettu-metsa-houkuttelee-hyonteisia-ja-kaapia.html> (Viitattu: 10.3.2026).

Tilastokeskus (2025) *Kasvihuonekaasut*. Saatavissa: <https://stat.fi/fi/tilasto/khki> (Viitattu: 24.4.2026).

USDA (2012) 'Implementation Guide for Aerial Application of Fire Retardant'. Washington, DC: United States Department of Agriculture Forest Service Fire and Aviation Management. Saatavissa: [https://gacc.nifc.gov/oncc/logistics/aviation/docs/AFR\\_Handbook\\_03\\_29\\_2012\\_1145am.pdf](https://gacc.nifc.gov/oncc/logistics/aviation/docs/AFR_Handbook_03_29_2012_1145am.pdf).

Ward, D.S. *et al.* (2012) 'The changing radiative forcing of fires: global model estimates for past, present and future', *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(22), s. 10857–10886. Saatavissa: <https://doi.org/10.5194/acp-12-10857-2012>.

Wasserman, T.N. & Mueller, S.E. (2023) 'Climate influences on future fire severity: a synthesis of climate-fire interactions and impacts on fire regimes, high-severity fire, and forests in the western United States', *Fire Ecology*, 19(1), s. 43. Saatavissa: <https://doi.org/10.1186/s42408-023-00200-8>.

van der Werf, G.R. *et al.* (2017) 'Global fire emissions estimates during 1997–2016', *Earth System Science Data*, 9(2), s. 697–720. Saatavissa: <https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017>.

Zhou, G. *et al.* (2025) 'Fire-driven disruptions of global soil biochemical relationships', *Nature Communications*, 16(1), s. 1190. Saatavissa: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56598-z>.