



PELASTUSOPISTO

Tulipalot: Paloissa vapautuvat kemialliset aineet, niiden vaikutukset terveyteen ja ympäristöön

Erikoistutkija Juha Laitinen
Pelastusopisto

Tutkimus-, kehittämis- ja
innovaatiopalvelut





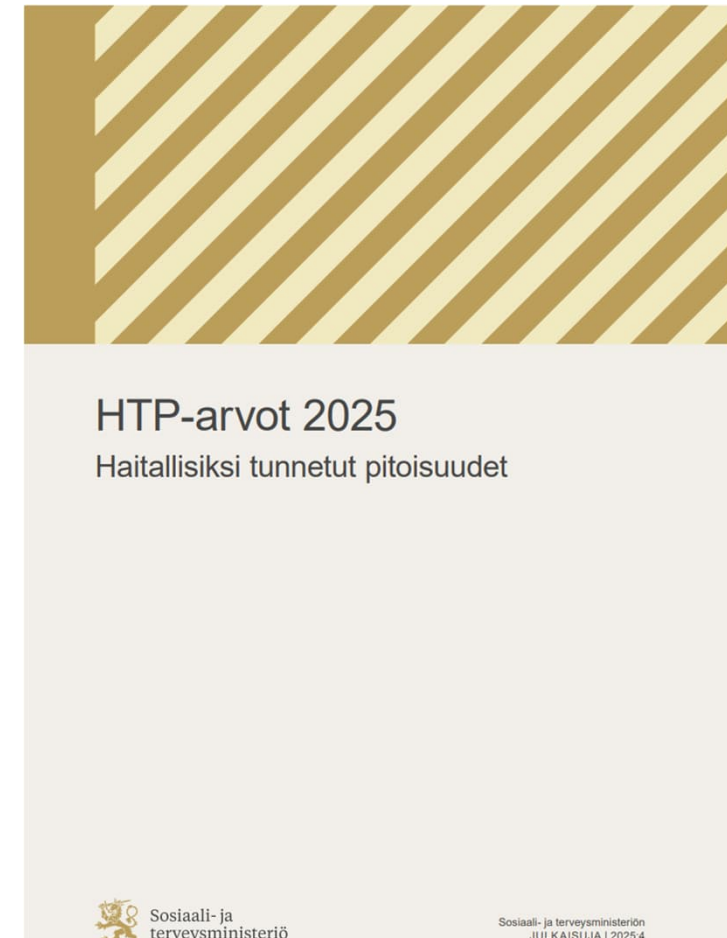
Luennon sisältö

1. Riskinarviointi, altisteet ja niiden vaikutukset
2. Rakennuspalot
3. Ajoneuvopalot
4. Maastopalot
5. Keinot päästöjen vähentämiseksi



1. Riskinarviointi

- Tunnistaa tärkeimmät altistavat tekijät
- Mitata löydettyjen altisteiden pitoisuustasot
- Löytää tekniset toimenpiteet altistumisen vähentämiseksi, kehittää työskentelytaktiikkaa ja –tekniikkaa, toisijaisesti hyödyntää henkilökohtaisia suojaimia, jotta altistuminen olisi mahdollisimman vähäistä
- Tiedottaa työntekijöitä olemassa olevista vaaroista ja mitä vaikutuksia niillä voi olla, sekä kuinka mahdollisia vaikutuksia seurataan



https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/166151/STM_2025_4_J.pdf?sequence=1&isAllowed=y



1. Palamisessa syntyvien kemiallisten aineiden haittavaikutukset

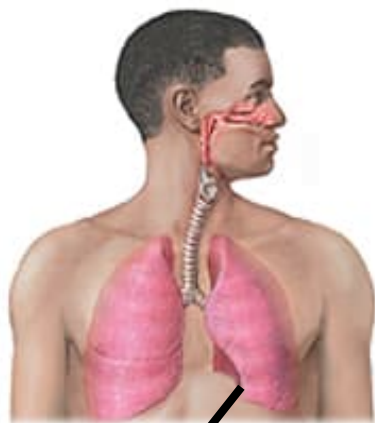
- Hapen kuljetuksen estäjät
 - Hiilimonoksidi, syaanivety, ja rikkivety
- Ärsyttävät kaasut
 - Kloori- ja fluorivety, typen oksidit, ja rikkidioksidi
- Pitkäaikaisia vaikutuksia aiheuttavat kemikaalit
 - Bentseeni, polysykliset aromaattiset hiilivedyt (PAH), formaldehydi, ja akroleiini
- Elimistöön keräytyvät aineet
 - Perfluoratut yhdisteet, lyijy, kadmium ja dioksiinit ja furaanit



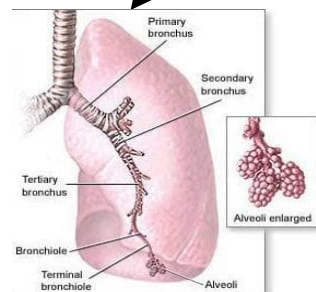


1. Altistumisreitit

Hengitystiealtistuminen



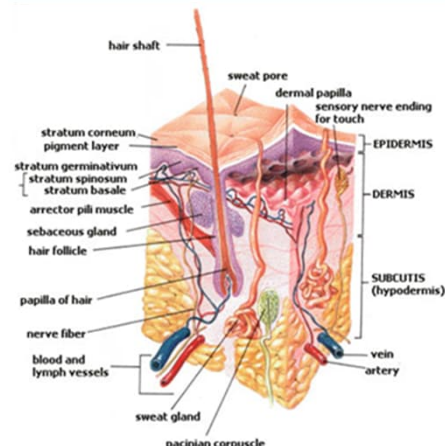
ADAM



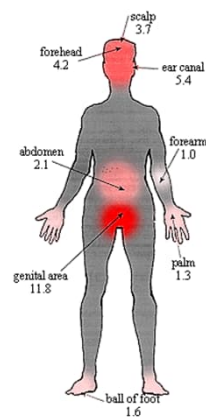
Otettu lähteestä:

<http://www.nytimes.com/health/guides/disease/sickle-cell-anemia/print.html>

Ihoaltistuminen



Otettu lähteestä: The Internet Encyclopedia of Science, 2010



Relative absorption rates, as compared to the forearm (1.0)

Otettu lähteestä: http://www.agf.gov.bc.ca/pesticides/b_2.htm

Altistuminen rs-kanavan kautta



Otettu lähteestä: Panu Oksa (Työterveyslaitos)



1. Kokonaisvaikutuksen arviointi

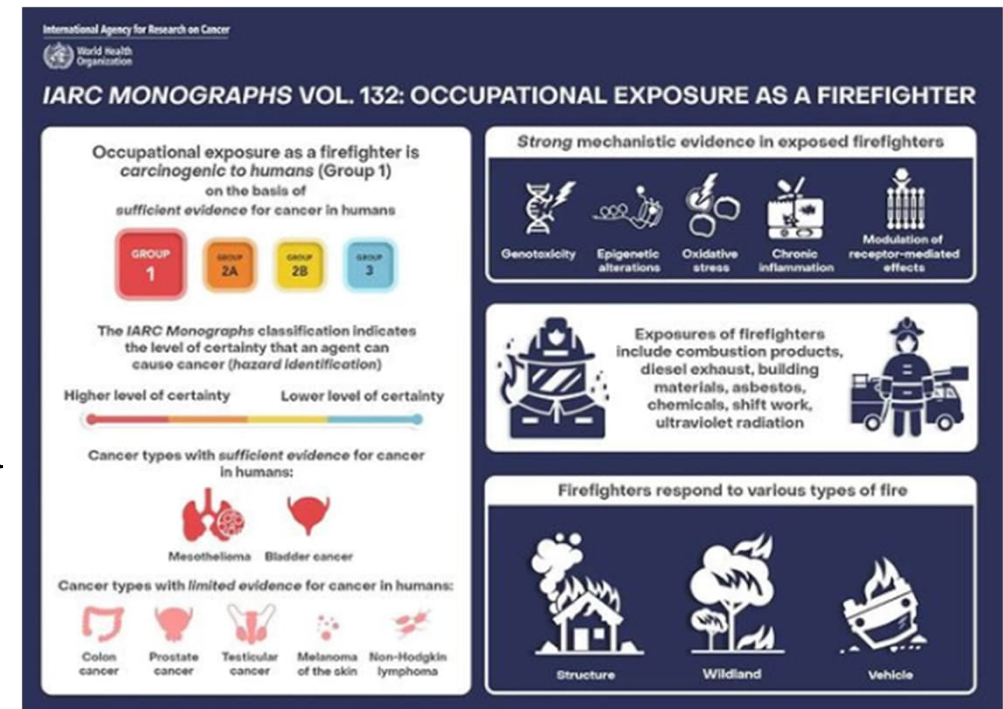


1. Palomiehen työn syöpävaarallisuus

-Palomiehen työn syöpävaarallisuus on nostettu ryhmään 1, joka tarkoittaa että palomiehen työympäristössään saama altistuminen aiheuttaa heille syöpätapauksia. Tutkimusnäyttö on nyt riittävä.

-Eri syöpätyyppien välillä on erilaisia epävarmuuksia ja riittävä näyttö on todettu olevan työperäisellä altistumisella ja mesoteliomalla (keuhkopussisyöpä) että virtsarakkosyövällä

-Rajoitettu näyttö on paksusuolen, eturauhasen, kivesten, ihosyövän ja Non-Hodgkinin lymfooman osalta





Rakennuspalot



2. Rakennuspallo: Perinteinen ja moderni rakennuspallo

PERINTEINEN TULIPALO

- pääasiallinen palava materiaali puu
- eristeet hengittäviä (puru, pinkopahvi)
- paperitapetit
- asbesti

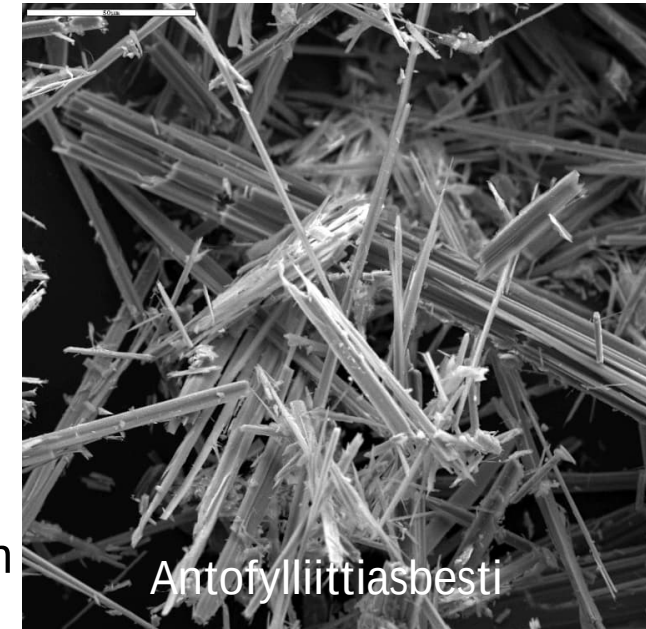
MODERNI TULIPALO

- erilaisia muoveja (ABS, PA, PU, PVC, PS)
- eristeet hengittämättömiä
- sähkölaitteita ja akkuja sekä paristoja
- aurinkopaneelit ja niiden energiavarastot
- palonestoaineita

MODERNIT PALOT KEHITTYVÄT NOPEAMMIN JA NIIDEN PÄÄSTÖT OVAT MYRKYLLISEMPIÄ

1. Yleistä asbestista

- Asbesti on luonnossa esiintyvä kuitumainen silikaattimineraali.
- Rakennusmateriaaliin sidottuna se ei aiheuta vaaraa terveydelle
- Asbestipitoisia rakennusmateriaaleja työstettäessä tai purettaessa, kuten sammutustehtävissä, jälkiraivauksessa, palontutkinnassa ja jälkivahinkojen torjunnassa asbestikuituja vapautuu ilmaan. Hengityksen mukana ne joutuvat keuhkoihin.
- Asbestikuidut ovat hyvin pysyviä jouduttuaan keuhkoihin ja ne aiheuttavat pitkän ajan kuluessa haitallisia muutoksia, jotka ovat palautumattomia.
- Asbestille altistumista tulee välttää kaikin tavoin!!!



Kuva otettu julkaisusta:

https://fi.wikipedia.org/wiki/Asbesti#/media/Tiedosto:Anthophyllite_asbestos_SEM.jpg

2. Asbestin terveyshaitat

-Asbestin vaikutukset terveyteen tulevat esiin vasta 10- 40 vuoden kuluttua altistumisen alkamisesta.

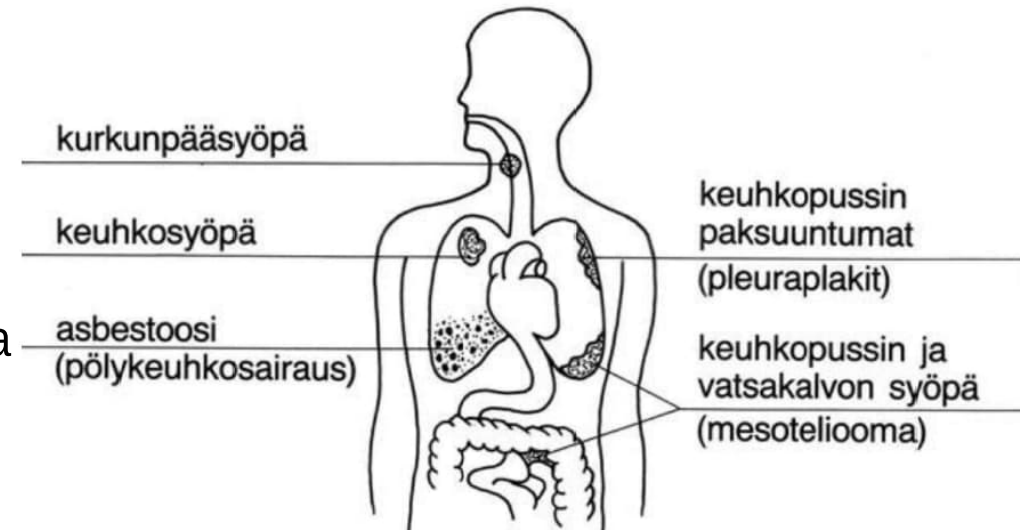
-Asbesti voi aiheuttaa muutoksia keuhkoissa ja keuhkopusseissa

1. Keuhkopussin paksuuntumat –pleuraplakit

Keuhkopussin paksuuntumat, plakit ovat yleisiä ja vaarattomia muutoksia keuhkopusseissa, keuhkon ulkopuolella. Ne eivät haittaa keuhkojen toimintaa. Pleuraplakit aiheutuvat jo vähäisemmästäkin altistumisesta kuin muut asbestisairaudet.

2. Asbestoosi

Keuhkopölysairaus, jossa hengittävää keuhkokudosta korvautuu sidekudoksella. Vaatii pitkäkestoisen altistumisen, lyhyestä altistumisesta sitä ei saa.



kuva otettu julkaisusta: <https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2016/11/asbesti-rakennustyossa.pdf>

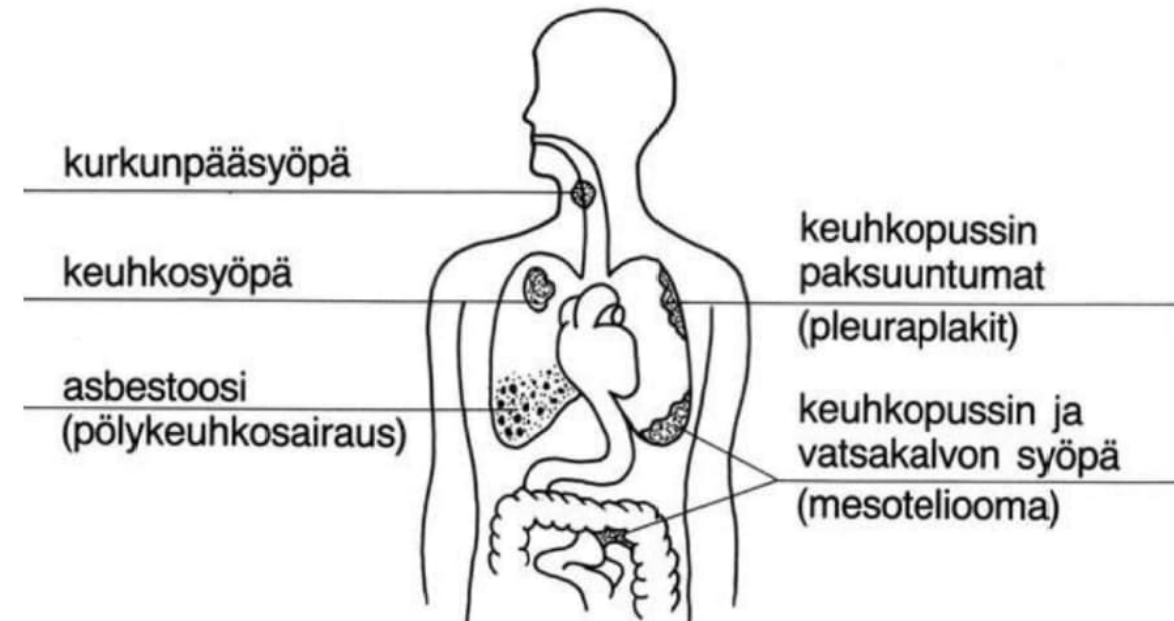
2. Asbestin terveyshaitat

3. Keuhkosityöpä sekä keuhkopussin ja vatsakalvon syöpä eli mesoteliooma

Pitkään voimakkaasti asbestille altistuneilla on jopa viisinkertainen riski sairastua syöpään verrattuna normaaliin altistumattomaan väestöön. Toisaalta turvallista pienintä altistumismäärää ei ole, vaan vähäinenkin altistuminen lisää sairastumisriskiä. Yli 70 -vuotiailla palomiehillä on 2,6 –kertainen riski sairastua mesotelioomaan (Pukkala ym. 2013).

4. Kurkunpään ja munasarjan syövät sekä retroperitoneaalinen fibroosi (vatsa-aortan päälle kehittynyt sidekudos)

Keuhkosityövän ja mesoteliooman lisäksi myös kurkunpään ja munasarjan syövät voi olla asbestin aiheuttamia. Samoin kuin vatsa-aortan päälle muodostuva sidekudos.



2. Asbestin tyypilliset käyttökohteet





Liikennevälinepalot

3. Litiumioniakkupalossa syntyvät kemialliset aineet

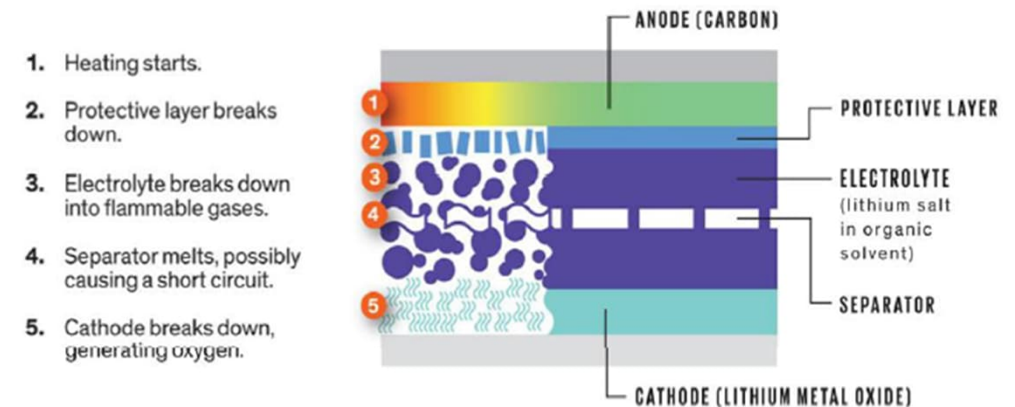
Suojakerros (SEI) anodin pinnassa käy epävakaaksi

- Muodostuu pienimolekyyllisiä yhdisteitä, kuten hiilimonoksidia, hiilivetyjä ja fluoriyhdisteitä

Suojakerroksen hajotessa elektrolyytti reagoi anodin litioidun grafiitin kanssa

- Elektrolyytti höyrystyy tuottaen karbonaatteja ja orgaanisia liuottimia
- Elektrolyytin suola litiumheksafluorofosfaatti lämpöhajoaa vetyfluoridiksi, fosforipentafluoridiksi, fosforyylifluoridiksi. Kosteuden vaikutuksesta näistä muodostuu vetyfluoridia.
- Elektrolyytistä voi vapautua myös perfluorattuja yhdisteitä

Thermal Runaway in a Lithium-Ion Battery

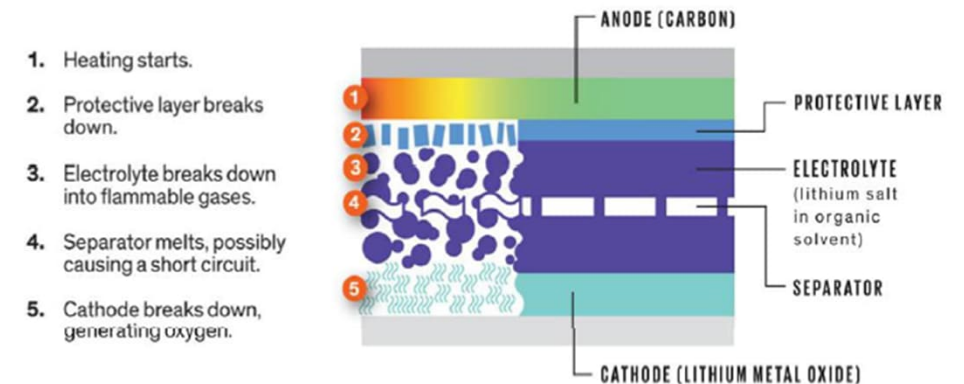


3. Litiumioniakkupalossa syntyvät kemialliset aineet

Erottimen sulaessa aiheutuu kennoon sisäinen oikosulku. Katodi hajoaa ja alkaa tuottaa happea palamiseen. (Wu et al. 2018)

- Kuumia metalliheitteitä käytetyn akkukemian mukaisesti
- LCO; Litium-kobolttidioksidi (150°C)
- NCA; Litium-nikkelikobolttialumiinioksidi (160°C)
- NMC; Litium-nikkelimangaanikobolttioksidi (210°C)
- LMO; Litium-mangaanioksidi (TR:265°C)
- LFP; Litium-rautafosfaatti (TR: 310°C)
- Erottimen materiaalista (polyvinyylideenifluoridi) voi syntyä myös fluoriyhdisteitä

Thermal Runaway in a Lithium-Ion Battery





3. Tunnistettujen kemikaalien haittavaikutuksia

Mitattu altiste	HTP _{8h}	HTP _{15min}	Yksikkö	Huom.	Vaikutus terveyteen
Hiilimonoksidi	20	75	ppm	ototoksinen	Hapen kuljetuksen estäjä
Typpidioksidi	0,5	1	ppm	-	Ärsyttävä, keuhkopöhö
Fosforihappo	1	2	mg/m ³	-	Syövyttävä, ärsyttävä
Fuorivety (happo)	1,5	2,5	mg/m ³	iho	Syövyttävä, ärsyttävä, keuhkopöhö
Kloorivety (happo)	-	7,6	mg/m ³	-	Syövyttävä, ärsyttävä, keuhkopöhö
Bentseeni	3,25	-	mg/m ³	iho, sitova raja-arvo	Syöpävaarallinen, hermostovaikutukset
Fosforyylikloridi		2,4	mg/m ³		Syövyttävää, tappavaa hengitettynä (H330)
Formaldehydi	0,37	1,2	mg/m ³	kattoarvo	Ärsyttävä, syöpävaarallinen
Akroleiini	0,05	0,12	mg/m ³		Ärsyttävä, syöpävaarallinen
Bentso[a]pyreeni	0,01	-	mg/m ³	iho	Syöpävaarallinen
Naftaleeni	5000	100000	µg/m ³	-	Ärsyttävä
Nikkeli	0,01	-	mg/m ³	iho	Ihoärsytys, syöpävaarallinen
Koboltti	0,02		mg/m ³	-	Ihoärsytys, astma, mahdollisesti syöpää aiheuttava
Mangaani	0,2	-	mg/m ³	-	Hermosto- ja keuhkovaikutukset



3. Sähköauton versus polttomoottoriauton päästöt

Käyttövoiman vaikutus palossa vapautuviin päästöt

- Lecocqin ym. 2012
 - Tutkimuksessa molempien käyttövoimien hiilidioksidin (CO_2), hiilimonoksidin (CO), kokonaishiilivetyjen, typenoksidien (NO , NO_2), vetykloridin (HCl) ja vetysyanidin (HCN) kokonaispitoisuudet olivat samankaltaisia.
 - Fluorivetyypäästöt olivat polttomoottoriautoilla 621-813 g ja vastaavasti sähköautoilla 1470-1540 g. Akun energiasisällön suhteen päästöt olivat 50-105 mg/Wh
- Hynynen ym. 2023:
 - Tutkimuksessa molempien käyttövoimien hiilidioksidin (CO_2), hiilimonoksidin (CO), kokonaishiilivetyjen, kokonaispitoisuudet olivat samankaltaisia
 - Fluorivetyypäästöt polttomoottoriautoissa oli 11–15 g, kun taas sähköautoilla määrä oli 120-859 g. Akun energiasisällön suhteen päästöt olivat 15-42 mg/Wh, niissä testeissä joita ei häiritty sammutustoimilla
 - Litiumin, alumiinin, koboltin, kuparin, mangaanin, nikkelin ja sinkin päästöt olivat suurempia sähköautoissa
 - Polttomoottoriajoneuvoissa havaittiin korkeampi lyijypitoisuus verrattuna sähköajoneuvoihin, ollen vastaavasti 7–18 g ja 2,5–5 g. Molemmissa oli samankaltaiset lyijyakkuiset käynnistysakut.

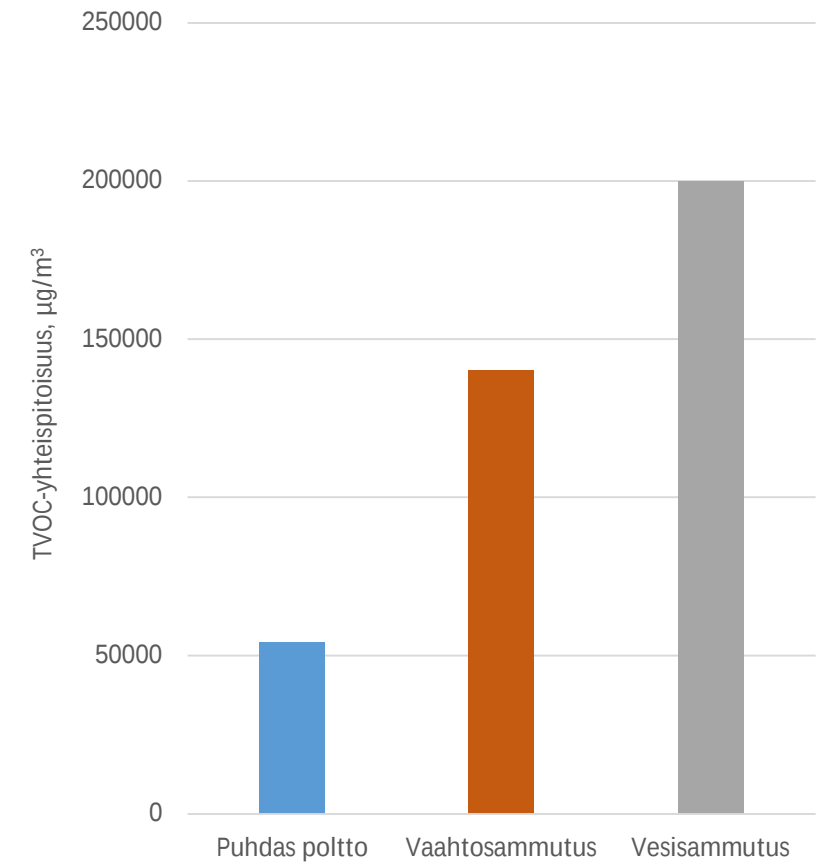
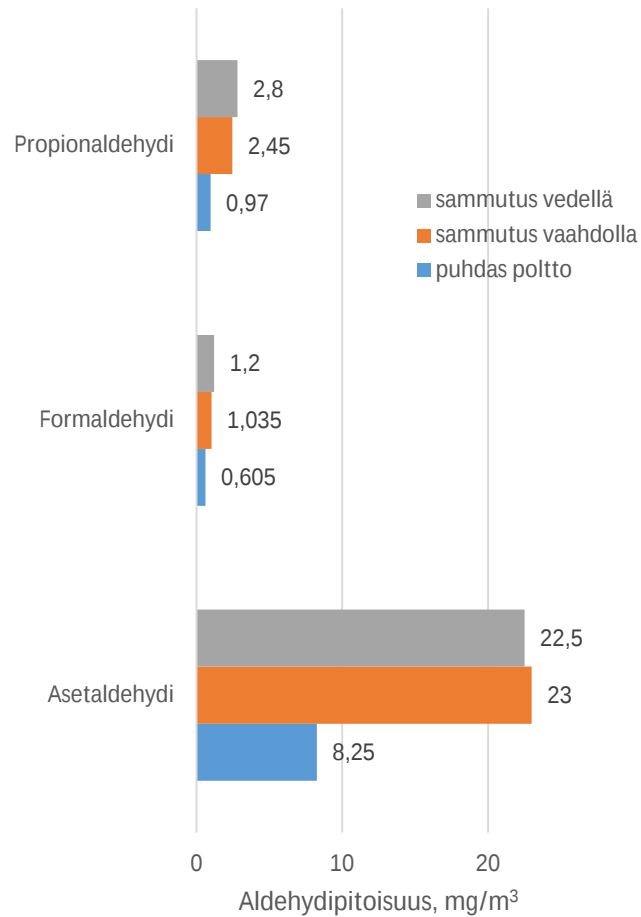
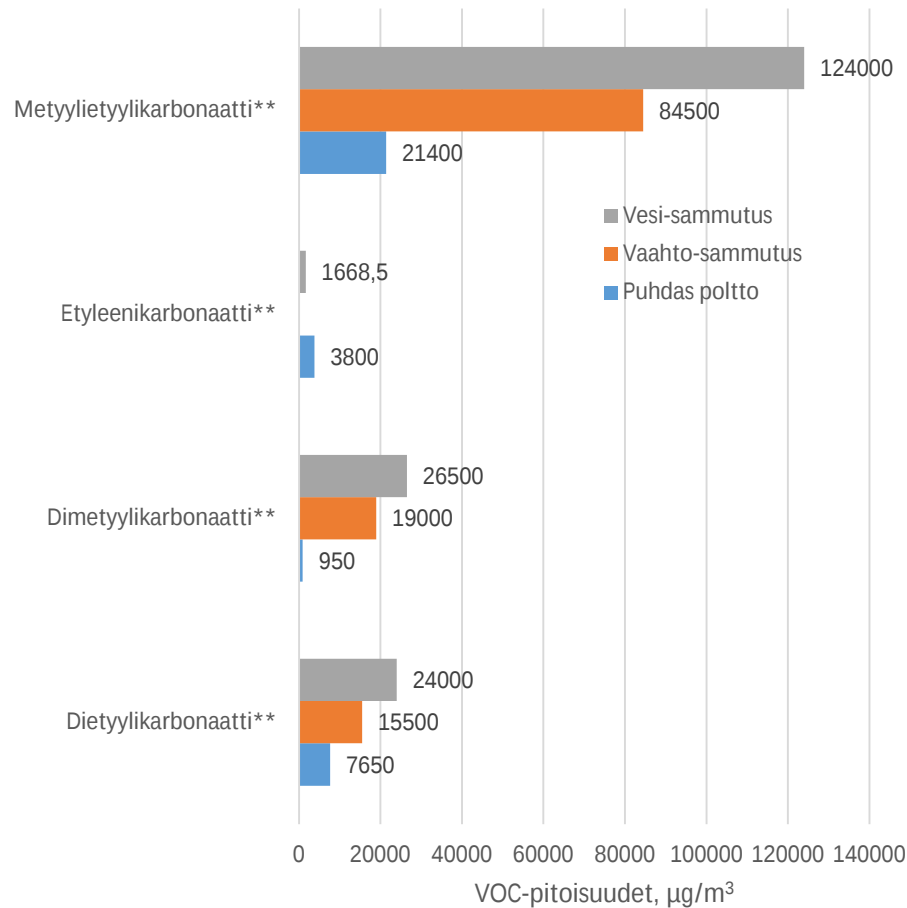


3. Litiumioniakkujen fluorivetyypäästöjä

- Fluorivedyn päästö (LMO) akuista oli 36-68 mg/Wh (Ribiere ym. 2012)
- Fluorivedyn päästö (LFP) akuista oli 50-105 mg/Wh (Lococqin ym. 2016)
- Fluorivedyn päästöt (LFP akuille) 1. testi 170-200 mg/Wh, 2. testi 60-125 mg/Wh, 3. testi 10-25 mg/Wh, 4. testi 50 mg/Wh (Larsson ym. 2017)
- Fluorivedyn päästö (LCO akuille) 20 mg/Wh (Larsson ym. 2017)
- Fluorivedyn päästö (NMC) akuista 15-42 mg/Wh (Hynynen ym. 2023)



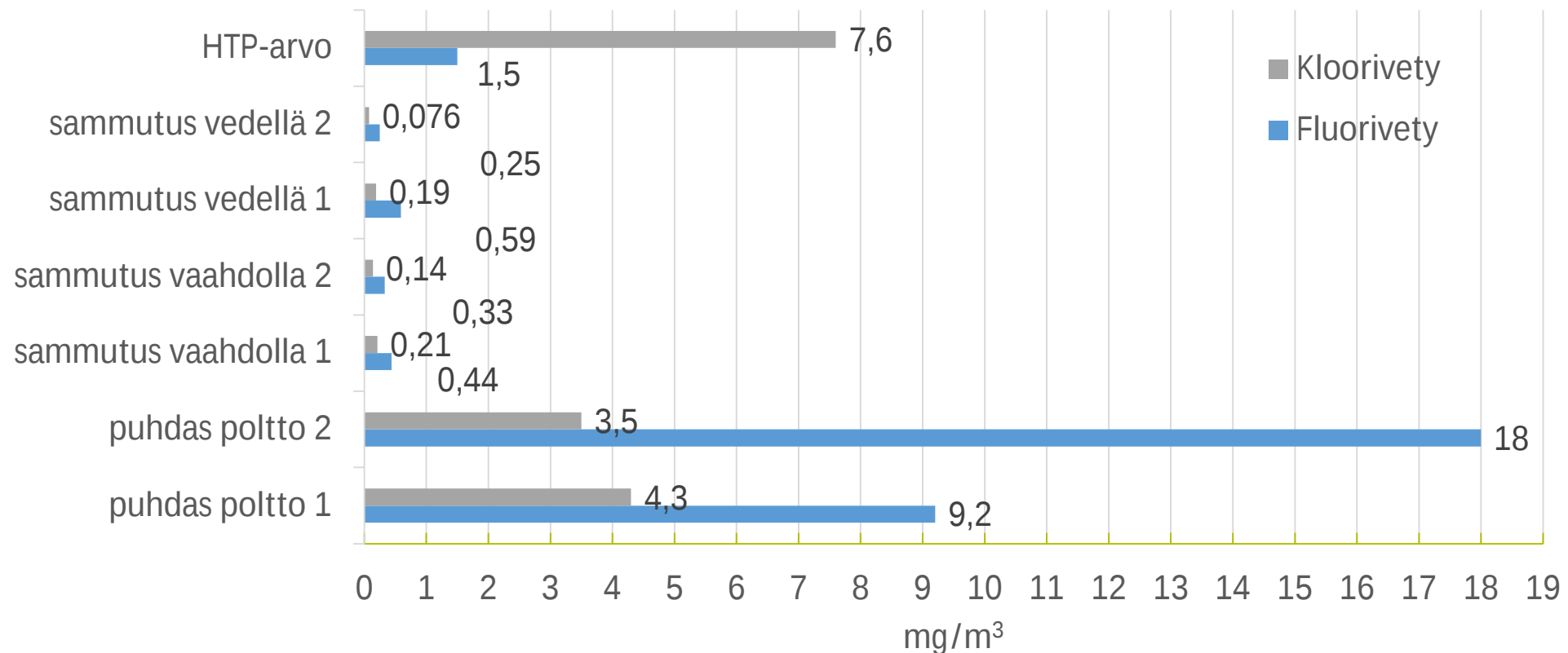
3. Sammutustoiminnan vaikutus päästöihin





3. Sammustoiminnan vaikutus päästöihin

- Elektrolyytin suolan hajoamisesta vapautuvat kaasut:





3. Päästöt upotusveteen

-Testissä oli kymmenen NMC-kennoa, jotka upotettiin veteen kymmenen sekunnin palon jälkeen seitsemään litraan ionivaihdettua vettä

-veden fluoridipitoisuus nousi suhteessa palaneiden kennojen määrään, kun neljä kennoa tuhoutui ylittyi 7 litrassa upotusvettä poikkeavan jäteveden raja-arvo 50 mg/l (Oulun Vesi 2020).

-Veden pH vaihteli upotuksen jälkeen 6,5 - 8,5

-Suurimmat metallipitoisuudet mitattiin upotusvedestä, jonka pH oli 8,5.

-Suurin nikkelpitoisuus oli 880 µg/l, joka ylittää poikkeavan jäteveden raja-arvon 500 µg/l .

-Suurin mangaanipitoisuus oli 1200 µg/l, joka on 24-kertainen juomavedelle annettuun raja-arvoon nähden

-Suurin kobolttipitoisuus oli 360 µg/l, joka on normaaleihin rengaskaivonäytteiden tuloksiin verrattuna 470-kertainen

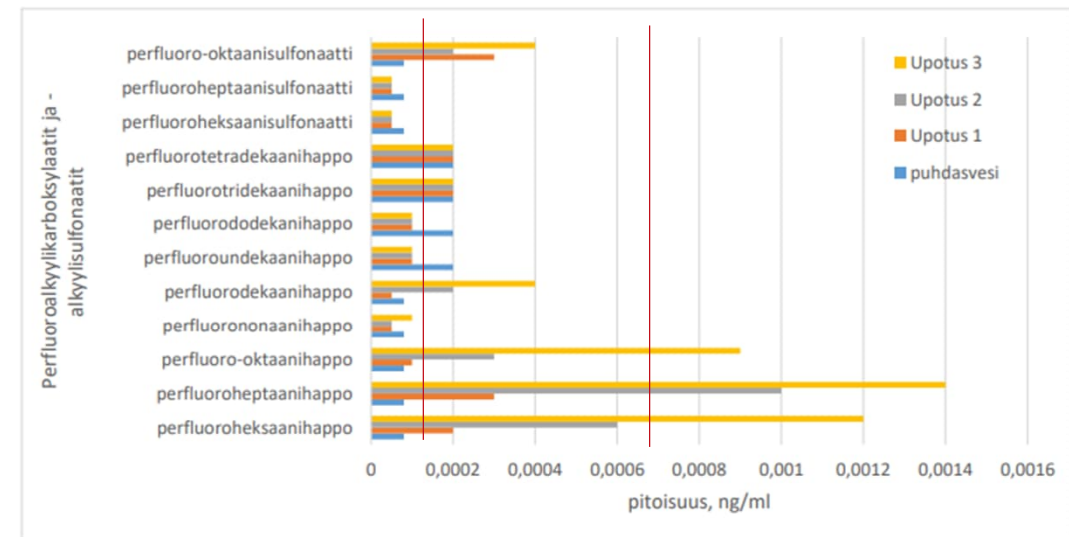


Kuva 1. Testeissä käytettyjä 18650 -kennoja.



3. Päästöt upotusveteen

- Vesinäytteistä löytyi myös PFAS-yhdisteitä, jotka ovat luonnossa ja myös ihmisessä erittäin hitaasti puoliutuvia
- Perfluoro-oktaanisulfonaatin (PFOS) ja sen hapon (PFOA) puoliintumisaika ihmisessä on noin 3 vuotta (Li ym. 2019)
- Perfluoroheksaanisulfonaatilla sen puoliintumisaika ihmisellä on 4,7 vuotta (Li ym. 2019)
- PFAS-yhdisteiden kriittinen vaikutus on niiden vaikutus immuunivasteeseen

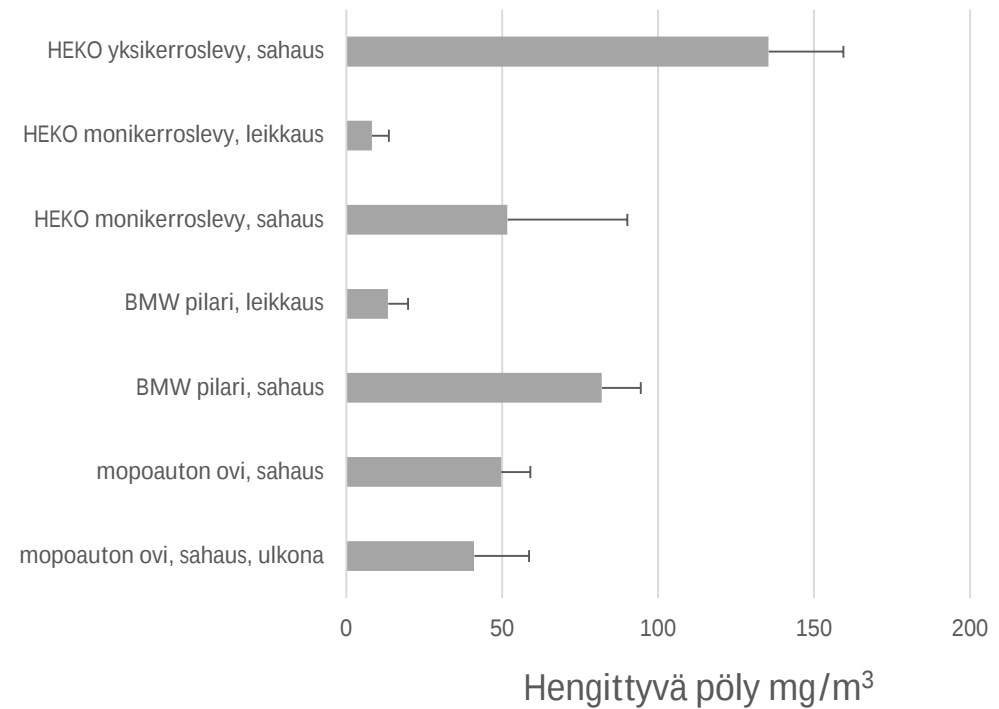


Kuva 20. Perfluorokarboksylaattien ja niiden sulfonaattien pitoisuudet upotusvedessä käytettäessä herkempää mittausmenetelmää lisäupotustesteissä. Meriveden ympäristönormi (EQS) perfluoro-oktaanisulfonaatille on 0,00013 ng/ml ja makealle vedelle 0,00065 ng/ml.



3. Esimerkkejä altistumistilanteista: Liikenneonnettomuus

- ☐ Komposiittihiilikuitua sisältävä ajoneuvo
- ☐ Puukkosahalla sahatessa kuitupitoisuus oli 190 000 kuitua neliösenttimetrillä sahaajan palopuvussa
- ☐ Palopuvun suojaustehokkuus yli 99 % Pitkähihaisen ja lahkeisen asemapalvelupuvun kanssa





Maastopalot



4. Mille metsäpaloissa altistutaan ja mitä siitä seuraa?

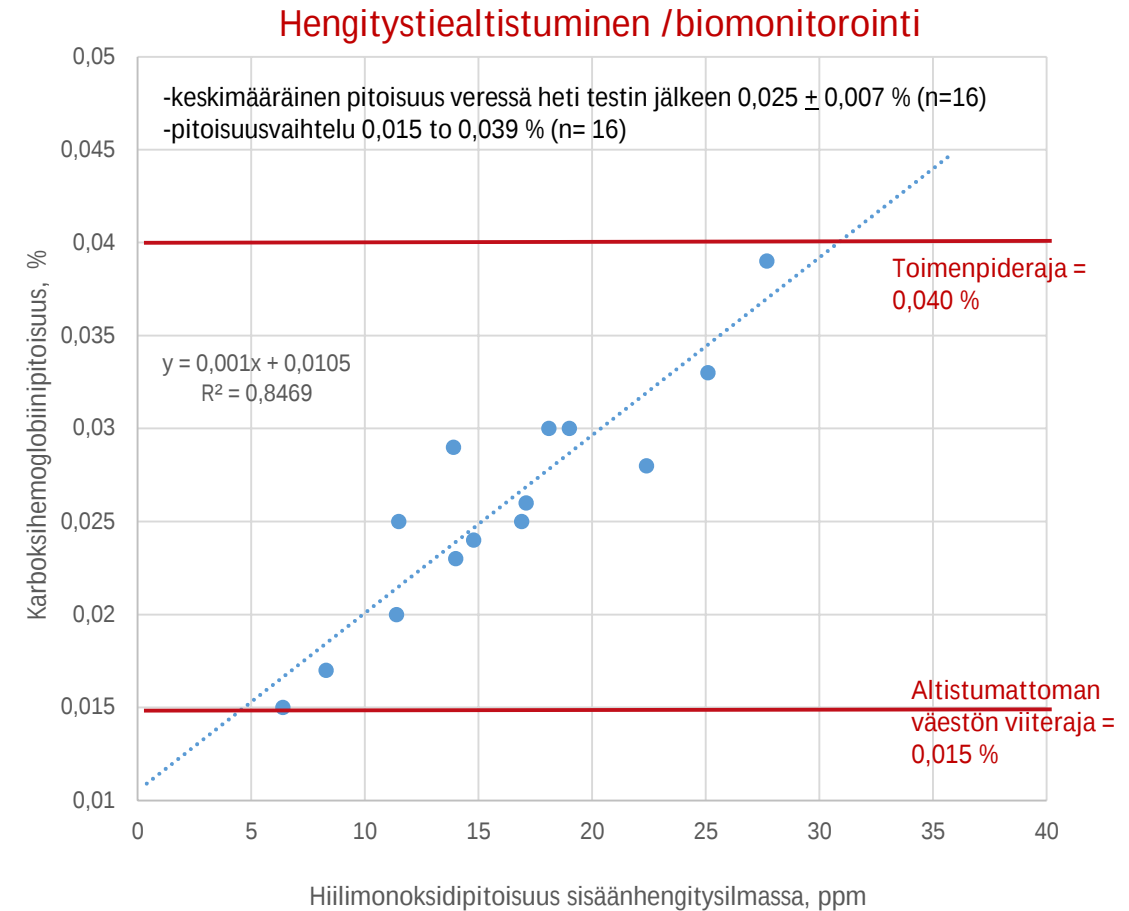
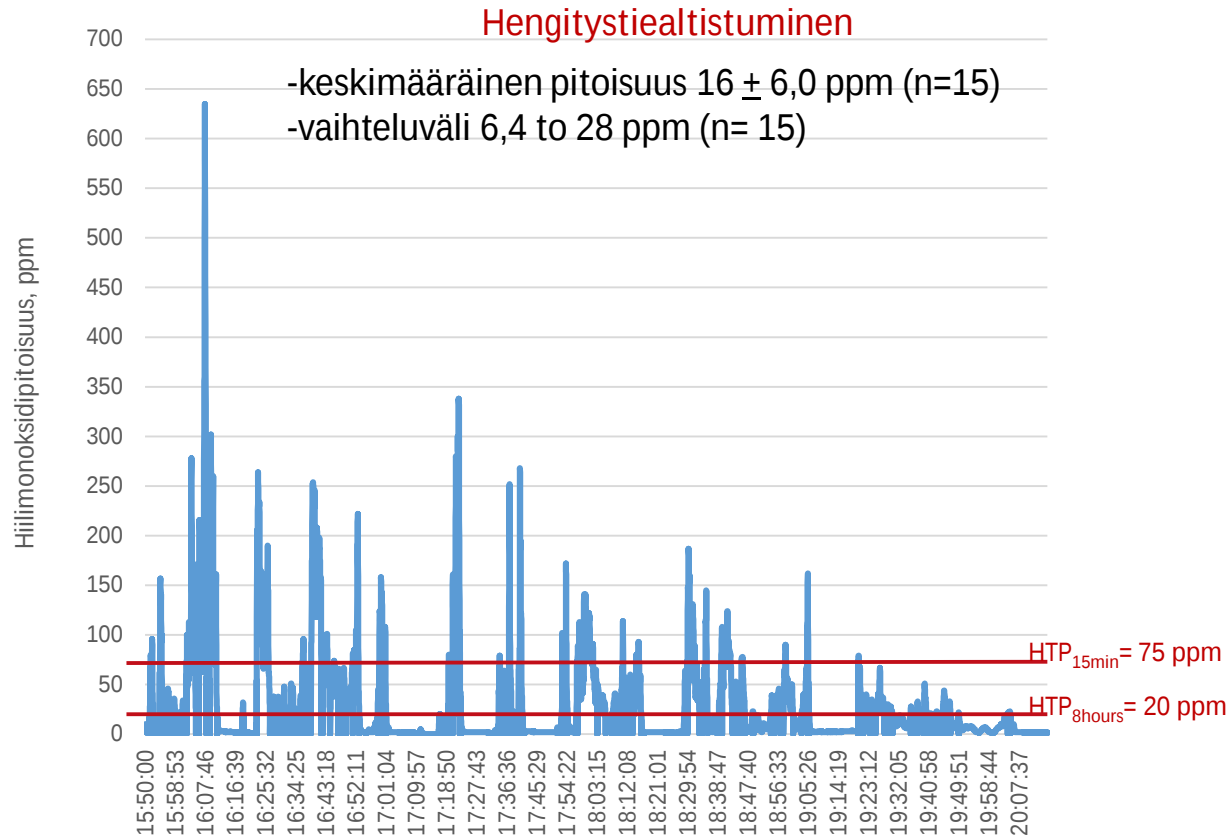
- ❖ Hapen kuljetuksen estäjät
 - ✓ Hiilimonoksidi
- ❖ Tulehdusta keuhkoissa aiheuttavat tekijät
 - ✓ Akroleiini, formaldehydi ja typen oksidit
- ❖ Keuhko- ja sydänsairauksia pahentavat tekijät
 - ✓ Pienhiukkaset
- ❖ Pitkääaikaisia vaikutuksia aiheuttavat tekijät
 - ✓ Bentseeni, polysykliset aromaattiset hiilivedyt (PAH), formaldehydi, akroleiini ja cesium-137



Kuva: Juha Laitinen

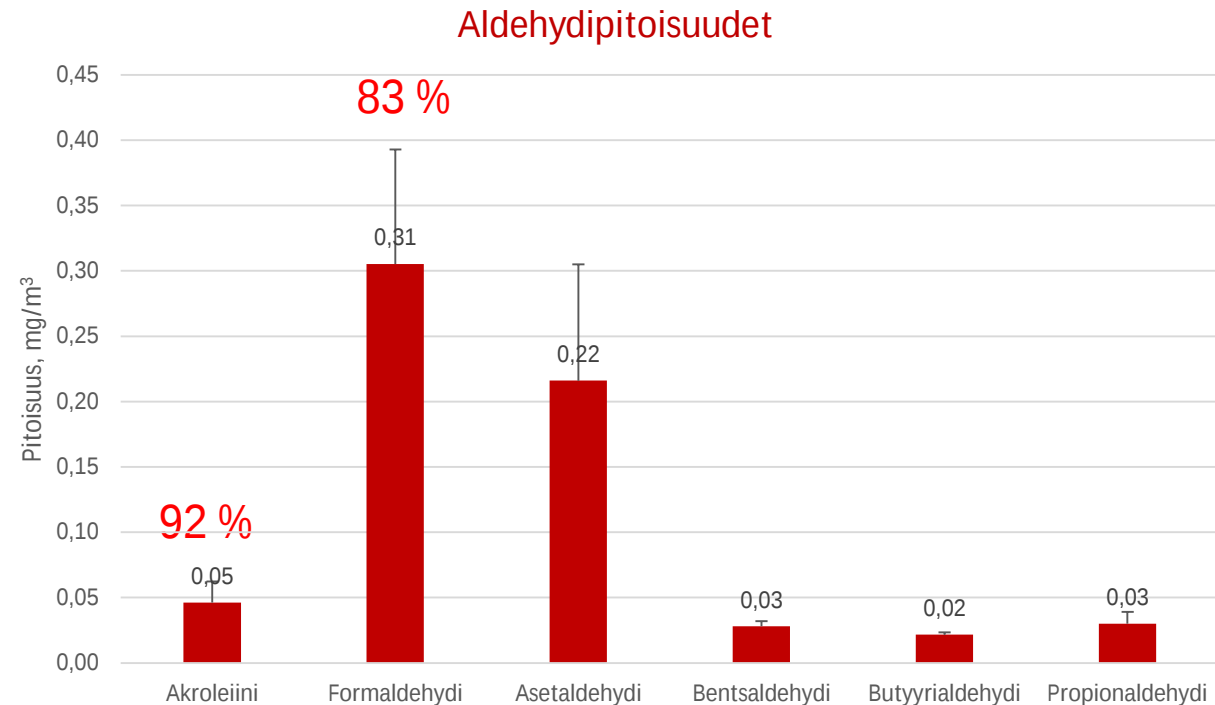


4. Hengitystiealtistuminen, hiilimonoksidi



4. Hengitystiealtistuminen, aldehydit

- Akroleiinialtistuminen:
 - $0,046 \pm 0,016 \text{ mg/m}^3$
 - $0,025 - 0,066 \text{ mg/m}^3$
 - $\text{HTP}_{8\text{tuntia}}: 0,050 \text{ mg/m}^3$
 - $\text{HTP}_{15\text{min}}: 0,120 \text{ mg/m}^3$
- Formaldehydialtistuminen:
 - $0,31 \pm 0,09 \text{ mg/m}^3$
 - $0,17 - 0,50 \text{ mg/m}^3$
 - $\text{HTP}_{8\text{tuntia}}: 0,37 \text{ mg/m}^3$
 - $\text{HTP}_{15\text{min}}: 1,2 \text{ mg/m}^3$



Yhteisaltistuminen 1,8 –kertainen aldehydien haitalliseksi tunnettuun yhteispitoisuuteen nähden.



4. Hengitystiealtistuminen, hengittyvä pöly

□ Hengittyvä orgaaninen pöly:

Pieksämäki

- keskiarvo $8,4 \pm 7,2$ mg/m³, vaihtelu 5,5 -15 mg/m³

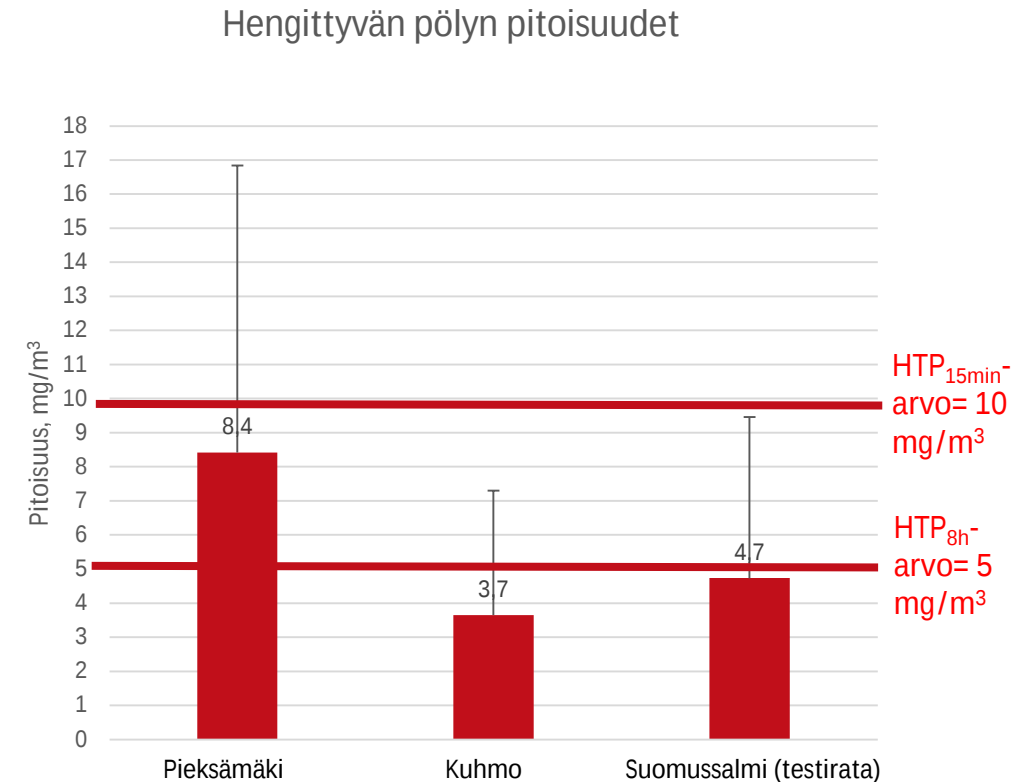
Kuhmo

- keskiarvo $3,7 \pm 0,5$ mg/m³, vaihtelu $3,3 \pm 4,0$ mg/m³

Suomussalmi

- keskiarvo $4,7 \pm 1,7$ mg/m³, vaihtelu $3,2 \pm 6,6$ mg/m³

□ Hengittyvästä pölystä lisämäärityksiä





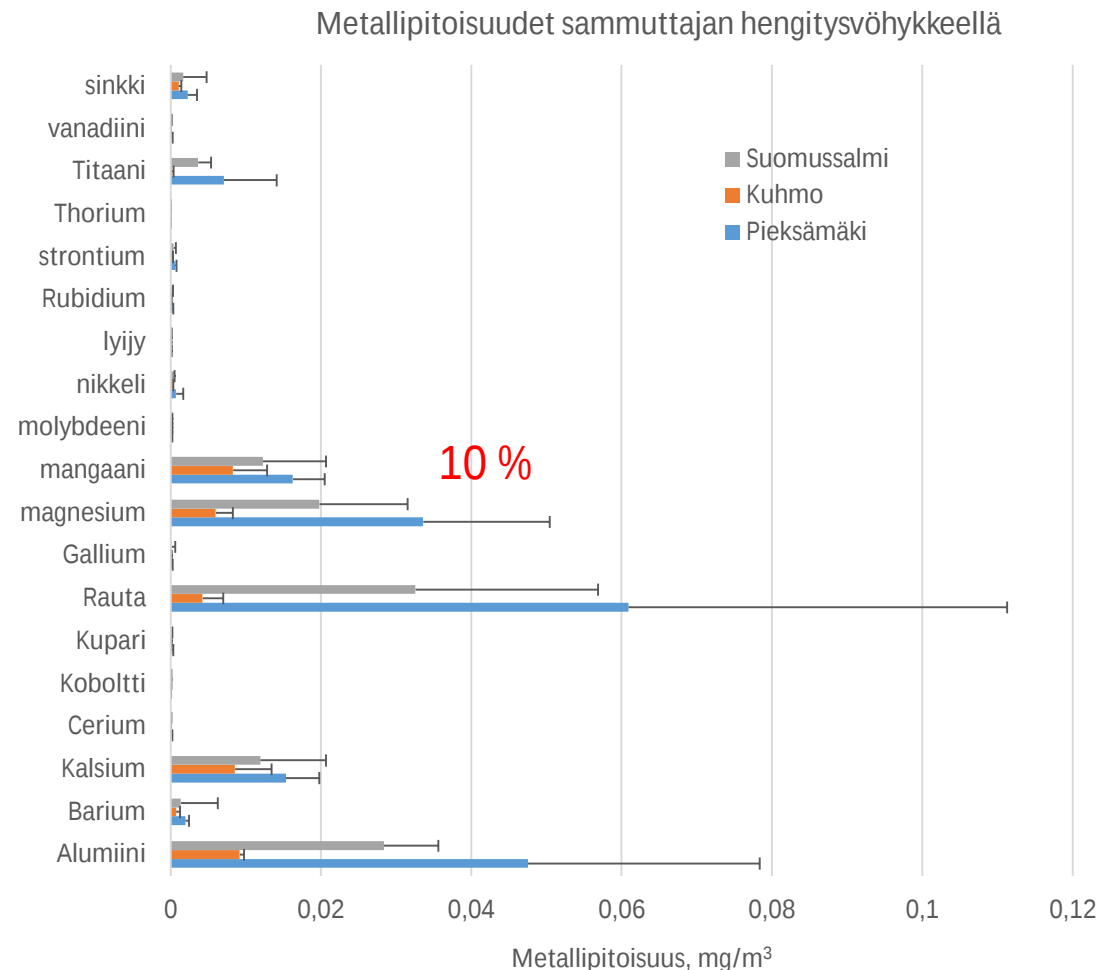
4. Hengitystiealtistuminen, alkuaineet

-36 alkuainetta tutkittiin pölynäytteestä ja ohessa niistä tärkeimmät

-Merkittävimmät altistumiset liittyvät mangaaniin, jonka HTP_{8h} -raja-arvo hengittyvälle pölylle on $0,2 \text{ mg/m}^3$

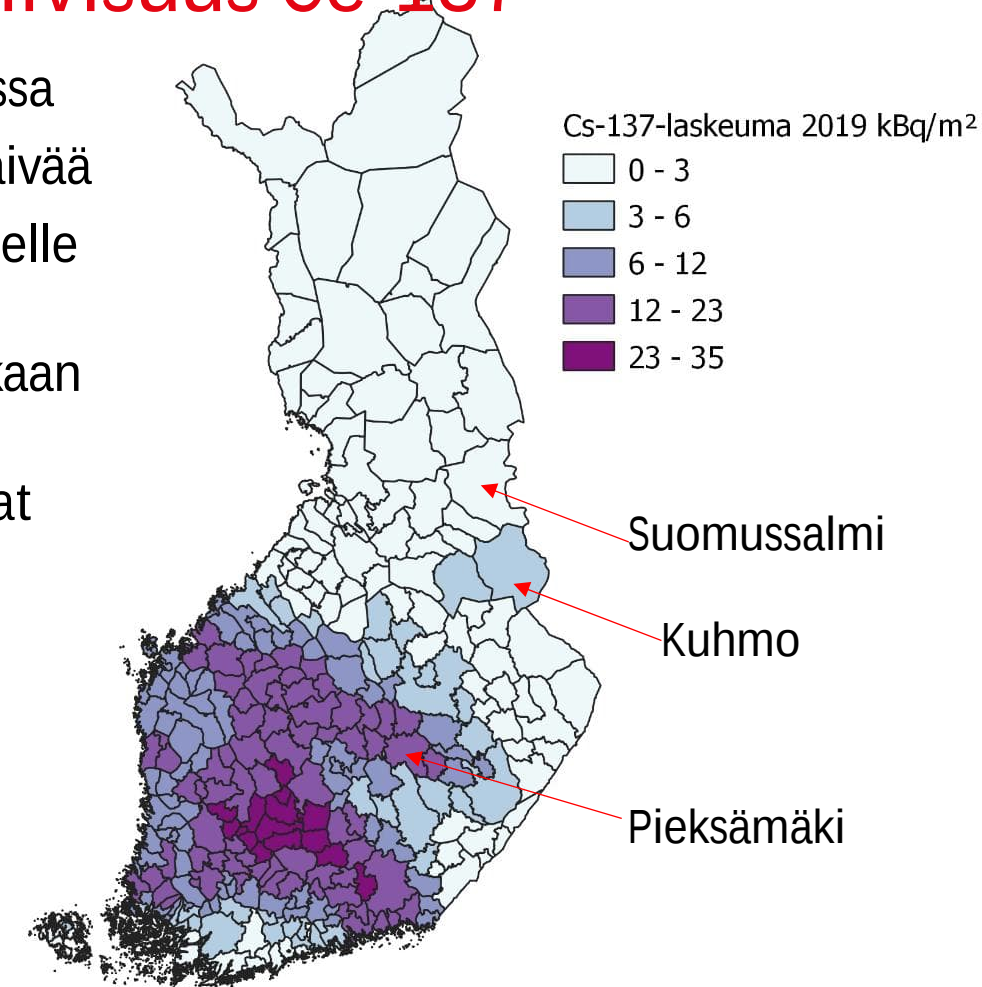
-Hienojakoisemmalle alveolijakeelle on annettu raja-arvo $0,02 \text{ mg/m}^3$

-Palamisessa syntyy paljon hienojakoista pölyä, joten suurimpia mitattuja pitoisuuksia voidaan pitää merkittävinä



4. Hengitystiealtistuminen, Radioaktiivisuus Ce-137

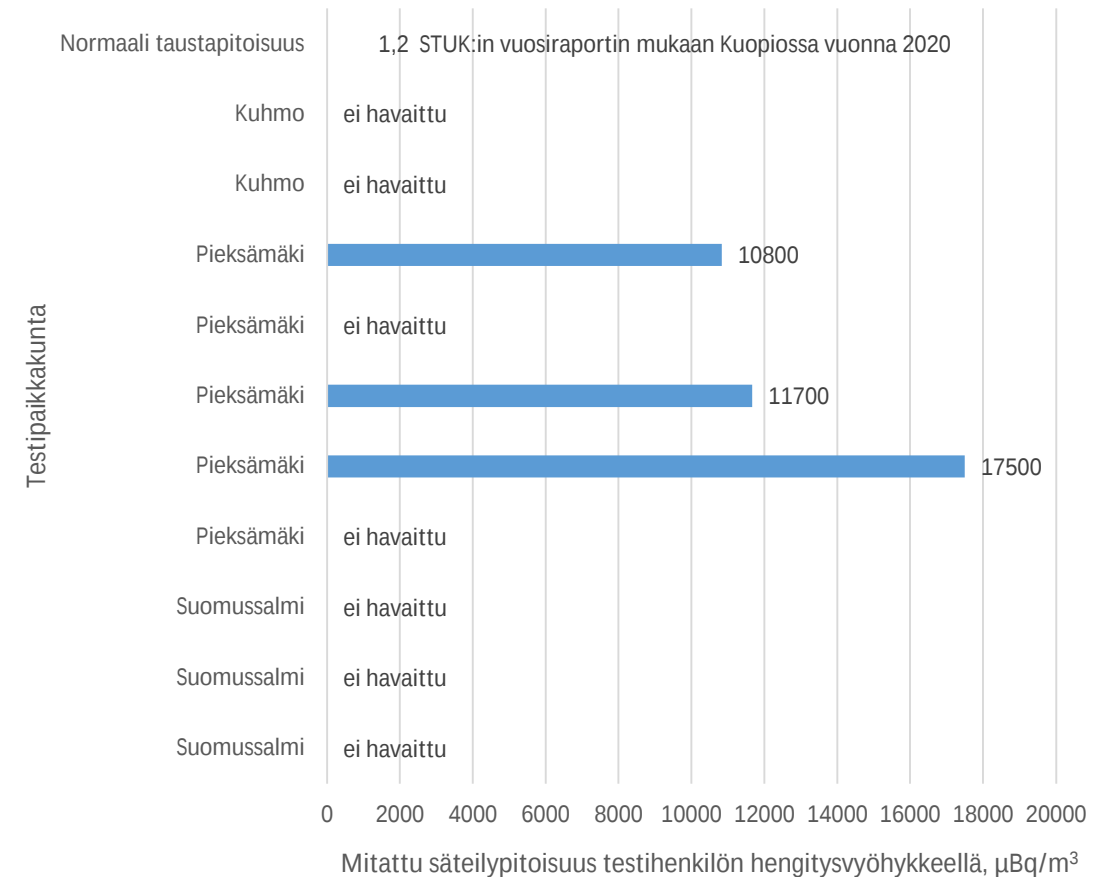
- Ce 137 on radioaktiivinen isotooppi, joka muodostuu fissioreaktiossa
- Puoliintumisaika on 30 vuotta ja biologinen puoliintumisaika 70 päivää
- Metsäpalotestejä tehtiin Pieksämäellä, Kuhmossa ja harjoitusalueelle siirretty siirtovarvikko oli Suomussalmelta.
- Tšernobylin Ce-137 laskeuma Suomeen on luokiteltu viiteen luokkaan vuonna 1986
- metsäpalotutkimuksessa käytettyjen Testipaikkojen laskeumaluokat olivat:
 - Pieksämäki 5
 - Kuhmo 2
 - Suomussalmi 1
- Pölynäytteistä tutkittiin Ce-137 Pieksämäeltä 5 näytteestä, Kuhmosta 2 näytteestä ja Suomussalmelta 3 näytteestä





4. Hengitystiealtistuminen, radioaktiivisuus Ce-137

- eniten laskeumaa saaneelta testausalueelta eli Pieksämäeltä löytyi kolmesta näytteestä Ce-137
- Ce-137 taustapitoisuus on $1,2 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ Kuopion mittausasemalla ([V24-STUK-B268 Ympäristön säteilyvalvonta Suomessa - Vuosiraportti 2020.pdf \(julkari.fi\)](#))
- mitatut pitoisuudet olivat 9000-14600 kertaisia normaaliin taustapitoisuuteen nähden
- säteilyonnettomuuksissa käytetystä alemmasta toimenpiderajasta pitoisuudet olivat kuitenkin vain 0,002 % eli terveydellinen vaara mitatuista pitoisuuksista on pieni





Keinot vähentää päästöjä

5. Keinot vähentää päästöjä

Rakennuspalo:

-Sammutustaktiikan valinnalla (hyökkäävä sisältäpäin sammuttaminen) voidaan vähentää rakennuksen vesivahinkoja ja päästä kiinni palopesäkkeeseen nopeasti, jolloin tuli sammuu nopeasti ja päästöt ilmaan myös vähenevät (palomiesten työturvallisuusriski)

-Jos kohteessa tiedetään olevan asbestia tai vastaavaa ympäristöön leviävää epäpuhtautta, käytetään sammutustekniikkaa joka levittää vähemmän epäpuhtauksia

-Savujen pesu sumusuihkulla, erityisesti soveltuu vesiliukoisille aineille



5. Keinot vähentää päästöjä

Likennevälinepalo:

- Nopealla sammuttamisella voidaan vähentää fluoriyhdisteiden päästöjä, mutta tuottaa enemmän palavia kaasuja

- Onnettomuuden sijainti vaikuttaa tilannejohtajan päätöksiin kuinka edetään.

- Esimerkiksi sähköauton palo kaupungissa on saatava nopeasti hallintaan, jopa sen upottaminen säiliöön voi tulla kysymykseen, yleensä tyydytään akun jäähdyttämiseen

- Sumusuihkun käyttö päästöjen laimentamisessa

- Sammutusvesien hallinta isossa roolissa päästöjen hallinnassa



5. Keinot vähentää päästöjä

Maastopalo:

- Ennakkovarautuminen maastopalokauteen Pelastuslaitoksilla
- Erityisen herkkien alueiden tunnistaminen
- Maastopalojen tunnistamisen ja paikallistamisen nopeuttaminen
- Tehokas yhteistyö eri toimijoiden välillä
- Ilmasammutusmenetelmien edelleen kehittäminen





5. Lisätietoja

1. Puustinen A. (toim.) (2022). Kalajoen Raution Metsäpalo 2021. Pelastusopiston julkaisu D-sarja muut julkaisut 3/2022. ISBN 978-952-7217-57-3, ISSN 2342-9305.
http://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja_D/D3_2022.pdf
2. Laitinen J., Hassinen M., Kiviranta K., Toivanen P., Huttu I., Savola R., Ahonen V., ja Ruusunen J., Rissanen S., Uusitalo A. (2022) Pelastajan työvälineet ja henkilökohtaiset suojaimet metsäpaloissa. Pelastusopiston tutkimusraportti 1/2022. ISBN 978-952-7217-56-6, ISSN 2342-9313. http://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja_B/B1_2022.pdf





PELASTUSOPISTO

Erikoistutkija Juha Laitinen | +358 503089302 | juha.laitinen@pelastusopisto.fi

Twitter: @juhalaitinen6; LinkedIn: <https://www.linkedin.com/in/juha-laitinen-05290358/>

Puh. 0295 450 201, PL 112 (käyntiosoite: Hulkontie 83), 70821 Kuopio

PELASTUSOPISTO.FI

