



Tuomo Rinne, Hanna Hykkyrä, Kati Tillander,  
Jarkko Jäntti, Timo Väisänen, Pasi Yli-Pirilä,  
Ilpo Nuutinen & Juhani Ruuskanen

## Jätekeskusten paloturvallisuus

| Riskit ympäristölle tulipalotilanteessa



# **Jätekeskusten paloturvallisuus**

## **Riskit ympäristölle tulipalotilanteessa**

Tuomo Rinne, Hanna Hykkyrä & Kati Tillander  
VTT

Jarkko Jäntti & Timo Väisänen  
Pelastusopisto

Pasi Yli-Pirilä, Ilpo Nuutinen & Juhani Ruuskanen  
Kuopion yliopisto

ISBN 978-951-38-7250-2 (nid.)  
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 978-951-38-7251-9 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)  
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2008

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 1000, 02044 VTT  
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 7001

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 1000, 02044 VTT  
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 7001

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland  
phone internat. +358 20 722 111, fax + 358 20 722 7001

VTT, Kivimiehentie 4, PL 1000, 02044 VTT  
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4815

VTT, Stenkarlsvägen 4, PB 1000, 02044 VTT  
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4815

VTT Technical Research Centre of Finland, Kivimiehentie 4, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland  
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 4815

Toimitus Maini Manninen

Edita Prima Oy, Helsinki 2008

Rinne, Tuomo, Hykkyrä, Hanna, Tillander, Kati, Jäntti, Jarkko, Väisänen, Timo, Yli-Pirilä, Pasi, Nuutinen, Ilpo & Ruuskanen, Juhani. Jätekeskusten paloturvallisuus. Riskit ympäristölle tulipalotilanteessa. Espoo 2008. VTT Tiedotteita – Research Notes 2457. 125 s. + liitt. 39 s.

**Avainsanat** waste fire, fire emissions, fire-fighting water, dioxins, PAH, fire safety, environmental impacts, emission factors

## Tiivistelmä

Tutkimuksen keskeisenä tavoitteena oli kartoittaa jätekeskusten paloturvallisuuteen liittyviä tekijöitä ja jätteiden palamisen ympäristölle aiheuttamia uhkia.

Tutkimuksessa kartoitettiin jätekeskusten paloturvallisuustasoa jätealan toimijoille ja pelastusviranomaisille suunnatulla kyselyllä sekä tehtiin suppea katsaus jätekeskuksissa sattuneisiin tulipaloihin. Hankkeen kokeellisessa osuudessa tarkasteltiin sekä pienessä että suuressa mittakaavassa eri jätejakeiden palamista ja sammuttamista ja analysoitiin palamisen ja sammuttamisen aikana syntyvien savukaasujen sekä sammutusjätevesien koostumusta. Kokeellisia tuloksia hyödynnettiin hankkeen laskennallisessa osuudessa, jossa arvioitiin savukaasupäästöjen leviämistä ympäristöön ja lämpösäteilyn vaikutuksesta aiheutuvaa palon leviämistä kohteesta toiseen.

# Alkusanat

Tämä julkaisu on hankkeen ”Jätekeskusten paloturvallisuuden parantaminen” loppuraportti. Hanke on toteutettu vuonna 2008 VTT:n, Kuopion yliopiston ja Pelastusopiston yhteistyönä. Hanketta ovat rahoittaneet VTT, Palosuojelurahasto, Paperinkeräys Oy, Jätekkukko Oy, Finanssialan keskusliitto ry, Kuopion yliopisto sekä Pelastusopisto.

Hankkeen toteutusta ohjaamaan perustettiin ohjausryhmä, jonka kokoonpanossa olivat edustajat seuraavilta tahoilta: ympäristöministeriö, sisäasiainministeriö, Paperinkeräys Oy, Jätekkukko Oy, Finanssialan keskusliitto ry, Suomen Palopäällystöliitto ry, Kuopion yliopisto, Pelastusopisto ja VTT.

Loppuraportin tekijät haluavat esittää kiitokset VTT:n Konsta Taimisalolle, joka osallistui merkittäväällä panoksella pienen mittakaavan kokeiden toteutukseen. Suuren mittakaavan kokeiden osalta osoitamme kiitokset VTT:n Arto Hätelälle ja Hemmo Juutilaiselle, jotka edesauttoivat osaltaan paloteknisten mittausten alkuvalmisteluja sekä Pelastusopiston harjoitusalueen palveluhenkiselle henkilökunnalle ja kokeiden sammutukseen osallistuneille opettajille Timo Laposelle, Pertti Miettiselle ja Ari Mustoselle.

Esitämme kiitokset myös hankkeen ohjausryhmälle, joka omalla työllään on panostanut hankkeeseen ja edistänyt sen toteutumista merkittäväällä tavalla.

Tekijät

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Alkusanat.....	4
Lyhenneluettelo.....	8
1. Johdanto.....	10
1.1 Tausta.....	10
1.2 Tavoite.....	10
1.3 Rajaukset.....	10
2. Jätekeskusten paloturvallisuus Suomessa.....	11
2.1 Yleistä.....	11
2.2 Kyselytutkimus.....	11
2.2.1 Tausta ja toteutus.....	11
2.2.2 Jätekeskukset ja kierrätyslaitokset.....	12
2.2.2.1 Yleistä.....	12
2.2.2.2 Tapahtuneet tulipalot ja varautuminen.....	12
2.2.2.3 Automaattiset hälytys- ja sammutusjärjestelmät.....	14
2.2.2.4 Pelastusharjoitukset.....	15
2.2.2.5 Yhteistyö pelastuslaitoksen kanssa.....	15
2.2.2.6 Henkilökunnan käytettävissä olevat alkusammutusvälineet ja suojaimet.....	16
2.2.2.7 Tulipalot, jotka sammutetaan itse.....	16
2.2.2.8 Paloriskit ja niiden pienentämiseksi tehdyt toimenpiteet.....	16
2.2.2.9 Syttymissyyt ja riskitekijät.....	19
2.2.2.10 Jätteenkäsittelylaitosten paloturvallisuustaso Suomessa.....	21
2.2.2.11 Paloturvallisuuden parantaminen.....	21
2.2.2.12 Tulipalojen raportointi.....	22
2.2.3 Pelastuslaitokset.....	22
2.2.3.1 Yleistä.....	22
2.2.3.2 Tapahtuneet tulipalot.....	22
2.2.3.3 Yhteistyö jätteenkäsittelylaitosten kanssa.....	24
2.2.3.4 Paloturvallisuustaso Suomessa.....	24
2.2.3.5 Paloturvallisuus- ja sammutusongelmat.....	25
2.2.3.6 Paloturvallisuuden parantaminen.....	26
2.2.4 Yhteenveto kyselytutkimuksesta.....	27
2.2.5 Kyselytutkimuksessa esille nousseita paloturvallisuuden parannustoimenpiteitä.....	29
2.3 Sattuneita tulipaloja.....	30

2.3.1	Keimolan rengasterminaalin palo 2.1.2004 .....	30
2.3.2	Jätehallin palo Kajaanissa 14.3.2006 .....	31
2.3.3	Kierrätysmateriaaleja hyödyntävän tuotantolaitoksen palo Lappeenrannassa 16.5.2006. ....	31
2.3.4	Paperivaraston palo Seinäjoella 15.6.2006 .....	32
2.3.5	Rengaspinnoittamon palo 19.7.2006 Pernajalla.....	33
2.3.6	Palo ongelmajätelaitoksella 3.7.2007 Tuusulassa .....	33
2.3.7	Rakennusjätteen palo Turussa 5.2.2005 ja 29.3.2007.....	33
2.3.8	Paperivaraston palo Seinäjoella 3.6.2008 .....	34
2.3.9	Kompostointilaitoksen palo Joutsenossa 21.6.2008.....	35
3.	Jätteiden palaminen.....	36
3.1	Yleistä.....	36
3.2	Aikaisempia tutkimuksia .....	39
3.2.1	Jätteiden palaminen .....	39
3.2.2	Savukaasupäästöt .....	40
3.2.3	Sammutusjätevedet .....	42
3.3	Haitalliset yhdisteet .....	43
3.3.1	Dioksiinit ja furaanit .....	43
3.3.2	Polyaromaattiset hiilivedyt.....	46
3.4	Päästökertoimet .....	50
4.	Kokeet.....	53
4.1	Pienen mittakaavan kokeet .....	53
4.1.1	Koelaitteisto .....	53
4.1.2	Päästömittaustekniikka.....	55
4.1.3	Koemateriaalit .....	55
4.1.4	Kokeiden kulku .....	56
4.1.5	Tulokset.....	60
4.1.5.1	Palotekniset mittaukset .....	60
4.1.5.2	Savukaasupäästöt .....	61
4.1.6	Päästökertoimien määrittäminen pienen mittakaavan kokeiden perusteella .....	63
4.2	Suuren mittakaavan kokeet.....	65
4.2.1	Yleistä .....	65
4.2.2	Koejärjestelyt .....	66
4.2.3	Mittaukset.....	68
4.2.3.1	Palotekniset mittaukset .....	68
4.2.3.2	Ilmaan vapautuvat haitalliset yhdisteet.....	68
4.2.3.3	Sammutusjätevedet .....	69
4.2.3.4	Sammutus.....	71
4.2.4	Tulokset.....	74
4.2.4.1	Palotekniset mittaukset, Koe 1 .....	74



4.2.4.2	Palotekniset mittaukset, Kokeet 2 ja 3 .....	75
4.2.4.3	Palotekniset mittaukset, Koe 4.....	79
4.2.4.4	Palotekniset mittaukset, Koe 5.....	80
4.2.4.5	Ilmaan vapautuvat haitalliset yhdisteet.....	83
4.2.4.6	Sammutus.....	89
4.2.4.7	Sammutusjätevedet .....	95
4.3	Tulosten vertailu kirjallisuuteen .....	96
4.3.1	Savukaasupäästöt .....	96
4.3.2	Sammutusjätevedet .....	98
5.	Jätteiden palamisen aiheuttamien riskien laskennallinen arviointi.....	99
5.1	Päästöjen kulkeutumisen laskentaan käytetyn ohjelman kuvaus .....	99
5.2	Päästöjen kulkeutumisen mallinnus .....	101
5.3	Tulokset päästöjen kulkeutumiselle .....	102
5.4	Yhteenvetoa päästöjen kulkeutumisen tuloksista.....	108
5.5	Palon leviämiskäsit .....	109
5.5.1	Palavan kohteen lähettämä lämpösäteily .....	109
5.5.2	Kriittinen etäisyys palavasta kohteesta, kun pinta-ala on vakio .....	111
5.5.3	Kriittinen etäisyys palavasta kohteesta, kun pinta-ala muuttuu.....	113
6.	Yhteenveto .....	115
	Lähdeluettelo .....	118

Liitteet:

Liite A: Kyselytutkimuksen kaavakkeet

Liite B: Kartiokalorimetrikokeiden tulokset rinnakkaisnäytteille

Liite C: Paloteknisten mittausten kuvaus suuren mittakaavan kokeissa

Liite D: Savukaasu- ja sammutusvesinäytteistä analysoidut polyaromaattiset hiilivedyt (PAH), klooribentseenit, kloorifenolit, polyklooratut bifenyylit (PCB), dioksiinit (PCDD) ja furaanit (PCDF)

Liite E: Kartiokalorimetrikokeiden ja suuren mittakaavan kokeiden analyysitulokset

# Lyhenneluettelo

A-vaahdo	Synteettinen sammutusvaahdoneste, jossa on yhdistelmä hiilivety-pohjaisia liuottimia, vakauttajia ja pintajännitystä vähentäviä aineita. A-vaahdotteen tehtävänä on pienentää veden pintajännitystä ja täten parantaa veden tunkeutumista huokoiseen materiaaliin.
Energiajäte (energiajäte)	Sekajätteestä lajiteltu jäte, josta voimalaitoksessa polttamalla saadaan lämpöä ja sähköä.
Kartiokalorimetri	Koelaitteisto, jossa näyte sytytetään palamaan sähkövastuksen synnyttämän lämpösäteilyn avulla. Laitteistossa käytetty näytekoko on $100 \times 100 \text{ mm}^2$ .
Lämpöarvo	Lämpömäärä, jonka aine massayksikköä kohti luovuttaa täydellisesti palaessaan. Kiinteiden ja nestemäisten polttoaineiden kohdalla lämpöarvo ilmoitetaan tavallisesti megajouleina polttoainekiloa kohti, [MJ/kg].
Lämpösäteily	Lämmön siirtyminen sähkömagneettisena säteilynä. Lämpösäteilyä on esimerkiksi kuumen kappaleen tai pinnan säteilemä energia kuten liekin loimu. Lämpösäteilyn yksikkönä käytetään yleisesti [kW/m <sup>2</sup> ].
PAH	Polyaromaattiset hiilivedyt
Paloteho (lämmönvapautusnopeus)	Palossa vapautuva lämpöenergia aikayksikköä kohti, yksikkönä käytetään tavallisesti [MW].
PCB	Polyklooratut bifenyylit
PCDD	Polykloorattu dibentsodioksiini
PCDD/F	Polyklooratut dioksiinit ja furaanit
PCDF	Polykloorattu dibentsofuraani
PET-murska	Kierrätysmuovipulloista murskaamalla saatu aines. Kierrätysmuovipullojen materiaali on polyeteenitereftalaatti.

Päästökerroin	Tulipalossa vapautuneiden haitallisten yhdisteiden tuotto palanutta massayksikköä kohden, jolloin päästökertoimen yksikkönä käytetään tavallisesti [g/kg].
RDF	(Refuse Derived Fuel) Lajittelemattomasta yhdyskuntajätteestä mekaanisella käsittelyprosessilla valmistettu polttoaine (lähde: <a href="http://www.vapo.fi/fin/palvelut/viestintapalvelut/biopolttoainetermeja">http://www.vapo.fi/fin/palvelut/viestintapalvelut/biopolttoainetermeja</a> ).
SER-murska	Murskattu sähkö- ja elektroniikkaromu.
Syttymä	Itseen ylläpitävä palaminen syttymislähteen vaikutuksen lakattua.
TEF	Toksisuusekvivalenttikerroin
Tehollinen lämpöarvo	Lämpömäärä, joka vapautuu, kun palaminen ei ole täydellistä. Tähän vaikuttavat mm. kosteus- ja happipitoisuus. Yksikkönä lämpömäärän yksikkö, [MJ/kg].
TEQ	Toksisuusekvivalentti
Vaimennuskerroin	Kuvaa valon säteen vaimentumista savussa. Vaimennuskerroin riippuu tulevan valon aallonpituudesta sekä hiukkasten koosta, muodosta ja optisista ominaisuuksista. Vaimennuskertoimen yksikkönä käytetään [1/m].
Vapautumisnopeus pinta-alayksikköä kohti	Palamisessa ilmaan vapautuva haitallisten yhdisteiden pitoisuus aikayksikköä ja palon pinta-alaa kohti, yksikkönä [g·s <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> ].

# 1. Johdanto

## 1.1 Tausta

Jätehuoltojärjestelmien kehittyessä on maahamme muodostettu alueellisia keskitettyjä jätteiden hyödyntämislaitoksia, joissa jätteet punnitaan, lajitellaan, varastoidaan, murskataan ja tarvittaessa paalataan hyödyntämistä varten joko materiaalina tai energianlähteenä. Kuntien alueellisten kaatopaikkojen loppusijoitettu sekajäte kasataan pinta-alaltaan suuriksi jätepenkoiksi.

Suoranainen uhka ympäristölle on suuren auman tai jätepenkan tulipalossa mahdollisesti syntyvä runsas savu ja savun mukana kulkeutuvat haitalliset aineet. Esimerkiksi Keimolan rengasterminaalin tulipalossa tuhoutui noin 150 000 rengasta, minkä voidaan Hieta- niemen ja Rinteen (2005) raportin ominaispäästöarvoja käyttäen arvioida synnyttäneen suuruusluokkaa 1 000 kg PAH-yhdisteitä, joka on merkittävä osa, suuruusluokkaa 5 %, Suomen vuotuisista PAH-päästöistä (15 000 kg vuonna 2000). Paikallisesti näin suuri päästö merkitsee vakavaa ympäristövahinkoa. Lisäksi suuren jäteauran palo voi olla voimakas ja siinä syntyvä lämpösäteily voi aiheuttaa vakavan ja vaikeasti hallittavan palon leviämisvaaran.

Välillisen uhan ympäristölle muodostaa suurien jätepenkkojen sammuttamisen hanka- luus: palo voi levitä syväpalona, sammutustyö kestää usein pitkään ja sammutus vaatii usein paljon sammutteiden käyttöä. Siten esim. sammutusveden mukana maaperään kulkeutuva ja edelleen leviävä haitallisten aineiden määrä voi olla suuri.

## 1.2 Tavoite

Hankkeen keskeisenä tavoitteena on kartoittaa jätekeskusten paloturvallisuuteen liittyviä tekijöitä sekä jätteiden palamisen ympäristölle aiheuttamia uhkia. Hankkeessa tutkitaan Suomen jätekeskustulipalojen taustoja sekä kartoitetaan jätekeskusten paloturvallisuus- tilannetta kyselytutkimuksella. Tavoitteena on myös mitata kokeellisesti ja arvioida las- kennallisesti eri jätemateriaalien aiheuttamaa uhkaa ympäristölle tulipalotilanteessa.

## 1.3 Rajaukset

Loppusijoitetun yhdyskuntajätteen (kaatopaikat) tulipalot rajattiin tutkimushankkeen pääpainopisteen ulkopuolelle. Hanke painottuu eri jätejakeita käsitteleviin kierrätyslai- toksiin, joiden määrä on viime vuosina kasvanut paljon. Tietyissä osissa raporttia, kuten kirjallisuustutkimusosuuksissa, sivutaan kuitenkin myös kaatopaikkapaloja.

## **2. Jätekeskusten paloturvallisuus Suomessa**

### **2.1 Yleistä**

Jätekeskusten paloturvallisuustilannetta tarkasteltiin toteuttamalla jätealan toimijoille ja pelastusviranomaisille suunnattu kysely sekä käymällä läpi joitakin sattuneita tulipalotapauksia, joista yleisesti julkistettua materiaalia oli saatavilla.

### **2.2 Kyselytutkimus**

#### **2.2.1 Tausta ja toteutus**

Kyselytutkimuksen avulla haluttiin selvittää, minkälaisia ongelmia jätealan toimijoiden mielestä liittyy jätekeskusten paloturvallisuuteen. Tutkimus suunnattiin erityisesti kierrätyslaitoksiin ja jätekeskuksiin, joissa käsitellään useita eri jätelajeja. Pelastustoimen edustajilta kysyttiin näkemyksiä jätekeskusten paloturvallisuudesta, suurimmista riskeistä ja jätetalojen sammuttamiseen liittyvistä ongelmista.

Jätteenkäsittelyalan toimijoille ja pelastustoimelle laadittiin omat kyselylomakkeet, jotka ovat liitteessä A. Jäte- ja kierrätysalan toimijoille suunnattu lomake lähetettiin kaikille Jätelaitosyhdistys ry:n (JLY) jäsenyrityksille (35 kpl) ja Ympäristöyritysten liitto ry (YYL) välitti sen omille jäsenilleen. Lisäksi lomake lähetettiin kahdeksalletoista kierrätysalan yritykselle. Pelastustoimelle suunnattu kyselylomake lähetettiin kaikille Suomen alueellisille pelastuslaitoksille (22 kpl). Kyselylomakkeet lähetettiin sähköisessä muodossa. Vastausten perusteella pyrittiin muodostamaan kokonaiskuva Suomen jätealan paloturvallisuustasosta ja sen keskeisistä ongelmista.

Kyselytutkimus oli tarkoitus rajata koskemaan vain kierrätyslaitoksia, mutta sekä jätteenkäsittelylaitosten että pelastustoimen vastauksissa tuotiin runsaasti esille myös loppusijoitusalueita koskevia ongelmia. JLY:n jäsenyrityksistä suurimmalla osalla loppusijoitus on merkittävä osa toimintaa, joten vastausmäärä olisi supistunut oleellisesti, mikäli nämä vastaukset olisi jätetty huomiotta. Loppusijoitusalueita koskevien vastausten nähtiin täydentävän hyvin kokonaiskuvaa jätteenkäsittelyalan paloturvallisuustilanteesta, joten ne oli hyödyllistä ottaa mukaan.

## 2.2.2 Jätekeskukset ja kierrätyslaitokset

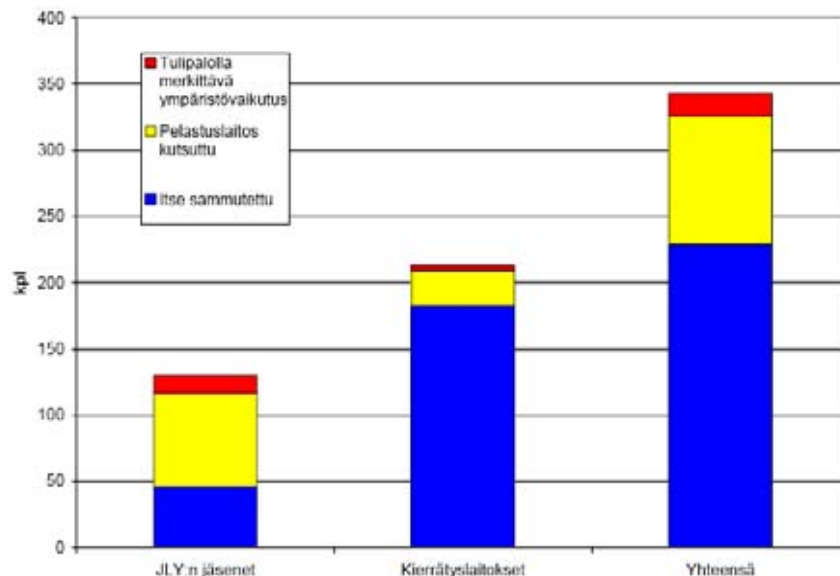
### 2.2.2.1 Yleistä

JLY:llä on 35 jäsenyritystä, joista vastasi 23 kpl eli noin 66 %. Lisäksi vastauksia lähetti 18 kierrätyslaitosta. Näistä osa oli YYL:n jäseniä. Yhteensä vastauksia saatiin 41 kpl. Kysymyslomake on liitteessä A.

Yrityksiltä kysyttiin esimerkiksi, montako tulipaloa laitoksella oli ollut viimeisten viiden vuoden aikana, montako niistä sammutettiin laitoksen oman henkilökunnan toimesta ja kuinka moneen kutsuttiin pelastuslaitos sammuttamaan. Lisäksi pyydettiin kertomaan, montako sellaista tulipaloa oli ollut, joista aiheutui vakavia ympäristöhaittoja. Vastaukset yrityksiltä saatiin kesä-heinäkuussa 2008, joten luvuissa ovat mukana siihen mennessä sattuneet tulipalot.

### 2.2.2.2 Tapahtuneet tulipalot ja varautuminen

Kuvassa 1 on esitetty JLY:n jäsenyritysten ja muiden kierrätyslaitosten ilmoittamat tulipalot. Itse sammutettuja syttymiä oli ollut yhteensä 229 kpl. Pelastuslaitos oli kutsuttu sammuttamaan 97 tulipaloa. Yhteensä tulipaloja oli ollut 315 kpl, joista vakavia ympäristöhaittoja aiheuttaneita tulipaloja oli ollut arviolta 17 kpl. Lukuja tarkastellessa on syytä huomioida, että osa yrityksistä kutsuu aina pelastuslaitoksen paikalle varmistamaan tilanteen, vaikka tulipalo olisi saatu itse sammutettua. Yhdellä kierrätyslaitoksella oli ollut huomattava määrä (93 kpl) itse sammutettuja tulipaloja, mikä on lähes puolet kaikista kierrätyslaitoksissa tapahtuneista tulipaloista.



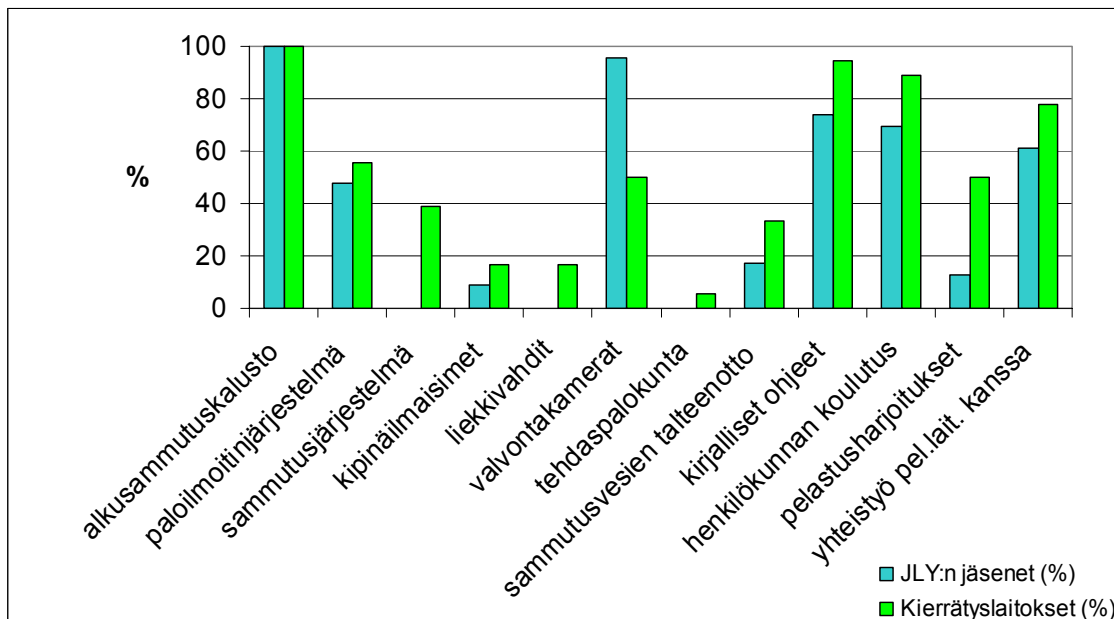
Kuva 1. Tulipalot jätteenkäsittelylaitoksissa viiden edellisen vuoden aikana.

Taulukkoon 1 on koottu, miten näillä laitoksilla on varauduttu tulipaloihin. JLY:n jäsenyritykset on tässä erotettu omaksi ryhmäkseen, koska niistä suurimmalla osalla ei ole varsinaisia kierrätyslaitoksia toimipaikoillaan. Kaikilla vastanneilla yrityksillä oli alkusammutuskalusto, mutta muutoin varautuminen tulipaloihin vaihteli huomattavasti sekä kaluston, koulutuksen että pelastuslaitoksen kanssa tehdyn yhteistyön suhteen.

*Taulukko 1. Jätteenkäsittelylaitosten varautuminen tulipaloon.*

<i>Laitoksella on tulipalon syttymisen varalta</i>	<i>JLY:n jäsenyritykset</i>	<i>Muut kierrätyslaitokset</i>	<i>Yht.</i>
Alkusammutuskalusto (käsिसammuttimet, palopostit yms.)	23	18	<b>41</b>
Automaattinen paloilmoitinjärjestelmä	11	10	<b>21</b>
Automaattinen sammutusjärjestelmä	0	7	<b>7</b>
Kipinäilmaisimia	2	3	<b>5</b>
Liekkivahteja	0	3	<b>3</b>
Valvontakameroita	22	9	<b>31</b>
Tehdaspalokunta	0	1	<b>1</b>
Varauduttu sammutusvesien talteenottoon	4	6	<b>10</b>
Kirjalliset ohjeet miten toimitaan tulipalon syttyessä ja pelastussuunnitelma	17	17	<b>34</b>
Järjestetty henkilökunnalle koulutusta, miten toimia tulipalotilanteessa	16	16	<b>32</b>
Järjestetty pelastusharjoituksia	3	9	<b>12</b>
Tehty yhteistyötä pelastuslaitoksen kanssa	14	14	<b>28</b>

Kuvassa 2 on esitetty samat tulokset prosenttiosuuksina.



Kuva 2. Jätteenkäsittelylaitosten varautuminen tulipaloon (%).

### 2.2.2.3 Automaattiset hälytys- ja sammutusjärjestelmät

Kyselyvastausten mukaan automaattinen hälytysjärjestelmä on useimmiten asennettu toimistotiloihin (noin 40 % vastaajista). Laitoksesta riippuen hälytysjärjestelmällä suojataan yksi tai useampia kohteita tai rakennuksia, parhaimmillaan kaikki. Automaattisia sammutusjärjestelmiä ei ollut yhdelläkään JLY:n jäsenyrityksellä, mutta kierrätyslaitoksista joka kolmannella. Kaikki vastaajat eivät eritelleet, mitä kohteita on suojattu ja millaisella järjestelmällä. Suojattuja kohteita olivat mm. vaaka-asema, vastaanotto- ja varastorakennukset, konesuoja, korjaamo, lajitteluhalli, ongelmajäteterminaali tai kierrätyskeskus. Erillisistä laitoksista, jotka on varustettu hälytys- tai sammutusjärjestelmillä, mainittiin kylmälaitteiden purkulaitos, kuvaputkien purkulaitos, biokaasulaitos, kierrätyspolttoaineen tuotantolaitos, kompostointilaitos ja keittiöjätteen murskauslaitos. Monella kierrätyslaitoksella tietyt prosessien riskikohteet, varastotilat, laitteet tai työkoneet on varustettu sammutusjärjestelmällä. Osa kierrätyslaitoksista on suojannut kaikki tilat automaattisilla järjestelmillä.

Sammutusjärjestelmissä käytetään sammutusaineena vettä, hiilidioksidia, vaahtoa tai jauhetta. Yhdessä laitoksessa käytetään myös argonia. Sammutusaine voi vaihdella käyttökohteittain. Yhdessä vastauksessa mainittiin, että laitoksella on käytössä kalvo-vaahtojärjestelmällä varustettu murskain.



#### 2.2.2.4 Pelastusharjoitukset

Pelastusharjoituksia on järjestetty pienellä osalla kyselyyn vastanneista laitoksista ja näistäkin vain osalla harjoitukset ovat säännöllisiä. Muutama kierrätyslaitos raportoi, että laitoksella järjestetään vuoden tai kahden välein yhteiset harjoitukset pelastuslaitoksen kanssa, joihin osallistuu suurin osa henkilökunnasta. Lisäksi saatetaan järjestää säännöllisesti omia koelaukaisuja tai sammutusharjoittelua. Muutamalla jätteenkäsittelylaitoksella pelastusharjoitukset olivat suunnitteilla.

Pelastusharjoituksissa kuvataan mahdollinen suuronnettomuus laitoksella niin että tilanne on todentuntuinen. Osa vastaajista luki pelastusharjoituksiin mukaan myös alkusammutus- ja ensiapukoulutuksen tai yleisen turvallisuussuunnittelun. Nämä vastaukset jätettiin pois luvuista.

#### 2.2.2.5 Yhteistyö pelastuslaitoksen kanssa

Suurin osa vastaajista ilmoitti, että pelastuslaitoksen kanssa on tehty yhteistyötä. Tyyppisiä yhteistyömuotoja ovat erilaiset tarkastukset, tutustumiskäynnit, koulutus, neuvonta ja tiedonvaihto. Palotarkastukset mainittiin useassa vastauksessa. Säännöllisten tarkastusten hyötynä mainittiin niiden yhteydessä esille tulevat kehitystä vaativat asiat tai kohteet. Lisäksi järjestetään tutustumiskäyntejä, joissa pelastuslaitokselle tarjotaan mahdollisuus tutustua laitoksen rakennuksiin, rakenteisiin tai toimintoihin. Tutustumiskäyntejä tehdään sekä uusiin että vanhoihin kohteisiin, mutta käyntien taajuus ja sisältö vaihtelevat paljon. Joillakin jätteenkäsittelylaitoksilla pelastuslaitos käy säännöllisesti, toisiin on tutustuttu vain kertaalleen.

Alkusammutus- ja ensiapukoulutusta sekä pelastusharjoituksia suunnitellaan ja toteutetaan yhdessä pelastuslaitosten kanssa, mutta tässäkin tapauksessa yhteistyön laajuus ja säännöllisyys vaihtelee. Joissakin yrityksissä harjoituksia järjestetään 1–3 vuoden välein, mutta osa yrityksistä ei ole järjestänyt lainkaan harjoituksia. Peruskoulutusten lisäksi voidaan järjestää erikoiskoulutusta, kuten korkeapainevaahdosammutusjärjestelmän käytön harjoittelua, tai harjoitella tietyn tyyppisen tulipalon sammuttamista (esimerkiksi metallipalo tai räjähdys).

Neuvonta käsittää mm. ATEX-säädöksiin, ongelmajätteiden varastointiin, alueen paloturvallisuuden parantamiseen ja pelastussuunnitelmien tekoon ja tarkastukseen liittyvän yhteistyön. Muita vastauksissa esille tulleita yhteistyömuotoja ovat laitoksen yhteyshenkilöiden tietojen päivitys, jätepenkereen kastelu kuivana aikana, paloilmoinjärjestelmän kuukausihuollon läpikäynti ja alkusammutuskaluston vuosittainen kartoittaminen.

### 2.2.2.6 Henkilökunnan käytettävissä olevat alkusammutusvälineet ja suojaimet

Kyselyvastausten perusteella henkilökunnan käytettävissä olevat alkusammutusvälineet ovat pääsääntöisesti käsisammutin (jauhe, vaahto, neste tai hiilidioksidi), paloposti ja sammutuspeite. Yksittäisiä mainintoja saivat vaahtopistooli, 1 m<sup>3</sup>:n vesiastia, hätäsuihku, integroidut sammuttimet, käsilaukaisin sammutusjärjestelmään ja uhps-sammutusauto. Penkkapalojen tukahduttamiseen on parilla laitoksella varattu kaivinkone ja maa-ainesta. Ainakin yhdellä laitoksella on varattu öljyntorjunta-aineita ja -puomi sekä imeytysainetta.

Useimmilla jätteenkäsittelylaitoksilla henkilökunnalla ei ole erityisiä suojarusteita tulipalon varalta. Normaalin työvaatetuksen lisäksi käytettävissä on lähinnä tavanomaisia suojaimeita, kuten moottoroidut tai moottoroimattomat hengityssuojaimeet, suojakäsineet, kuulonsuojaimeet, turvakengät, suojalasit ja kypärä, sen mukaan kuin työsuojelu edellyttää. Muutamilla laitoksilla on varauduttu myös tulipaloihin, jota varten käytettävissä voivat olla mm. sammutushaalarit, kaasunaamari, palokypärä ja kemikaalisuojapuku. Tehdas-palokunnalla on käytettävissään tulipalo- ja kemikaalionnettomuuksien suojarustus.

### 2.2.2.7 Tulipalot, jotka sammutetaan itse

Jätteenkäsittelylaitoksilla pystytään tyypillisesti sammuttamaan itse pienet, alkuvaiheessa havaitut tulipalot, jotka saadaan sammutettua normaalilla alkusammutuskalustolla. Rajatulla alueella, kuten jätelavalla, tapahtuvat tai yksittäiset työkonepalot ovat usein itse sammutettavissa. Osalla laitoksista kaikkiin paloihin pyydetään pelastuslaitos suorittamaan loppusammutus. Joillakin laitoksilla automaattinen paloilmoinjärjestelmä hälyttää aina pelastuslaitoksen, mutta alkusammutus pyritään silti tekemään itse. Eräs vastaaja uskoi, että kun sammutusjärjestelmä kattaa koko laitoksen, saadaan jatkossa kaikki tulipalot sammutettua itse.

### 2.2.2.8 Paloriskit ja niiden pienentämiseksi tehdyt toimenpiteet

#### 2.2.2.8.1 *Suurimmat paloriskit laitoksilla*

Vaarallisimmiksi paloiksi vastaajat arvioivat vaikeasti sammutettavat suuret sekajäte-, hake- ja energiajätteen penkka- ja kasapalot, ongelmajätepalot, rengaspalot ja hallitsemattomat metallipalot. Riskikohteita ovat lisäksi pahvin ja paperin paalauslaitos ja paalivarasto, kylmälaitteiden uretaanivarasto, biojäteauoma sekä biokaasulaitoksen kaasuväestö. Koneiden ja murskausasemien palaminen sekä kierrätysajoneuvojen saneerausprosessissa syttyvä tulipalo laskettiin myös suurimpien paloriskien joukkoon. Muita mainittuja vaaroja ovat palon leviäminen lähiympäristöön, kenttärakenteiden vaurioituminen,

kentän yläpuolella kulkevien korkeajännitesähkölinojen kaatuminen ja räjähdykset. Ulkoisista syttymisriskeistä mainittiin ukkonen.

#### ***2.2.2.8.2 Riskit henkilökunnalle, lähialueen asukkaille tai ympäristölle***

Tulipalon suurin vaaratekijä henkilökunnan, lähialueen asukkaiden tai ympäristön kannalta on useimpien vastaajien mielestä tulipalossa muodostuvat savukaasut. Tulipalossa ja sen sammuttamisen yhteydessä voi vapautua haitallisia yhdisteitä joko ilmakehään tai maaperään. Sammutusvesien kulkeutuminen maastoon ja öljyn pääsy maaperään ovat savun ohella merkittäviä ympäristöriskejä. Vaarana voi olla myös palon leviäminen lähiympäristöön (metsä- tai aluepalo). Tulipalo laitoksen sisällä voi aiheuttaa henkilövahinkoja (putoamiset ja kaatumiset, palokaasujen hengittäminen) ja pahimmillaan voi olla riski jäädä tuleen, jos leimahdus on suuri. Osa katsoi, ettei omalla laitoksella sattuvalla tulipalolla olisi vaikutusta lähiympäristöön.

#### ***2.2.2.8.3 Pahin mahdollinen tulipalo laitoksella ja sen seuraukset***

Vastaajat luettelivat koko joukon pahimpaan mahdolliseen tulipaloon liittyviä kriteereitä. Yleisin skenaario oli paljon myrkyllistä savua aiheuttava, laaja-alainen, pitkäkestoinen tulipalo, esimerkiksi sekajätteen penkkapalo tai rengaspalo, joka on vaikea sammuttaa. Sopivan tuulen myötä palo voi levitä muihin alueella oleviin jätekasoihin, rakennuksiin ja lähiympäristöön. Jos palo syttyy työajan jälkeen, se saa helpommin levitä ja voimistua kenenkään huomaamatta.

Ongelmajäte-, kaasu-, ja polttoainevarastojen palot ovat erityisen hankalia, koska paloihin voi liittyä räjähdyksiä ja ne ovat vaikeita sammuttaa. Esimerkiksi kloorattujen liuottimien syttyminen tuottaa myrkyllistä kaasua. Vastauksissa esitettiin lukuisia erityyppisiä paloja, joiden seuraukset olisivat vakavat joko laitoksen toiminnan tai työntekijöiden kannalta: ilkivaltainen murskausta odottavan puhtaana- ja maalatun puun varastoalueen palo (palavaa materiaalia yli 2 000 m<sup>3</sup>), energijaovaraston palo, uretaanisäkkien palo, pahvin ja paperin paalauslaitoksen ja paalikasojen palo, suuri tulipalo välipaperin leikkaus- ja energijätteen murskaushallissa tai paperivarastossa, palo keittiöjätteen käsittelylaitoksessa, tulipalo kaatopaikkakaasun keräysjärjestelmässä, maastopalo joka kaataa muuntamoalueelta tulevat korkeajännitysajkolinjat, laitoksen vastaanottobunkkerin tulipalo, jota ei saada hallintaan omilla sammutuslaitteistoilla, sekä koneen tai vaakakopin palaminen, jolloin suurin riski on ihmisellä, joka työskentelee sen sisällä.

Lähiympäristölle eri palotyypeistä voisi aiheutua seuraavia vaikutuksia: oman ja lähialueen laitosten evakuointi, lähiympäristön asukkaiden varoittaminen tai evakuointi, läheisen kantatien sulkeminen ja maaperän laajamittainen saastuminen. Seudun asukkaiden ja teollisuuden kannalta ongelmia voisi aiheuttaa myös jätehuollon vaarantuminen tai jätteiden käsittelyn pysähtyminen pitkäksi aikaa.

Pahimmillaan nähtiin mahdolliseksi täystuho, josta aiheutuu myös henkilövahinkoja: ”Kierrätyspolttoainekasa syttyy palamaan, REF:in lämpöarvo korkea, joten vaikea sammuttaa, koko laitos palaa, leviää viereiseen korjaamoon jossa säilytetään kuorma-autoja, myös kuljetuskalusto tuhoutuu, tuli leviää toimistotiloihin, jossa menetetään konttorikalusteet, tietokoneet, ohjelmat, yms. tieto. Menetetään samanaikaisesti kuljetuskalusto, konttori, laitos ja mahdollisesti myös henkilövahinkoja, kuolemantapauksia”.

#### ***2.2.2.8.4 Riskien pienentämiseksi tehdyt toimenpiteet***

Riskejä on pyritty pienentämään tiedottamalla ja toimintoja kehittämällä. Valvonnan lisääminen ja monimuotoinen henkilökunnan sekä asiakkaiden koulutus ovat yleisimmin käytettyjä keinoja.

Kuormien vastaanoton valvontaa on lisätty ja kuormien tarkastusta parannettu. Asiakkaalta varmistetaan, mitä jätettä lähetyksessä on. Kuljettajille järjestetään vuosittainen infotilaisuus. Sallitut tupakointipaikat merkitään ja jos havaitaan tupakointia väärässä paikassa, siitä huomautetaan. Palavien jätteiden läheisyydessä tupakointi on kielletty. Alueiden vartiointia ja valvontaa on tehostettu.

Peittämättömän jätteen pinta-ala pyritään pitämään mahdollisimman pienenä ja käytöstä poissaolevat täyttöalueet peitetään maa-aineksella. Varastokasojen koko pidetään kohtuullisena ja niitä muotoillaan tarvittaessa. Energiajätettä ei läjitetä kovin korkealle jotta itsesyttymisvaara saadaan minimoitua. Penkat tiivistetään huolellisesti päivittäin. Kaatopaikkapenkalla pidetään maata kasalla ja kaivinkone lähellä jätteen sammutusta varten. Varastot pyritään pitämään pienehkönä ja jätteiden kiertonopeus mahdollisimman korkeana. Tulipalon leviämisen estämiseksi varastoja osastoidaan tai erityyppiset jätteet varastoidaan eri tiloissa. Varastojen valvontaa on lisätty. Erityisen palovaaralliset jakeet säilytetään ulkona sijaitsevilla metallikantisissa siirtolavoissa, joissa on automaattinen sammutusjärjestelmä.

Potentiaalisia palolähteitä sisältävän kuorman vastaanottoon ja käsittelyyn on käytössä erilaisia varotoimia. Varoaika palokohteiden jätteen vastaanotolle on 3 vrk. Arinatuhkan kuormien tuominen edellyttää ennakoilmoitusta ja kuorma on tuotava aamupäivällä, jolloin valvontaa voidaan tehdä työpäivän aikana. Kuorma voidaan sijoittaa väliaikaisesti palamattomalle alustalle, josta se jäähtyneenä siirretään jätetäyttöalueelle ja hyödynnetään peittomaana. Tuhkan lämpötila on seurannassa, ja tuhka läjitetään erilliselle alueelle. Riskiherkät jätteet käsitellään mahdollisimman nopeasti.

Avotulen teko on kielletty kierrätysajoneuvojen saneerauspaikan läheisyydessä ja paikka on varustettu alkusammutuskalustolla. Kierrätysajoneuvoja ei varastoida pihalla vaan käsitellään välittömästi tuhopolttoriskin minimoimiseksi.

Säännöllinen laitehuolto ja siivous sekä sähkölaitteiden tarkastukset auttavat vähentämään paloriskejä. Huolto- ja korjaustöiden ajoittamisessa ja toteutuksessa on huomioitu paloturvallisuuskohdat. Esimerkiksi säiliöalueella on tavoitteena aiheuttaa mahdollisimman vähän kipinöitä, ja huoltotöitä varten on hankittu tulityövaunu. Murskauksessa muodostuvaa lämpöä valvotaan antureilla ja sen yhteyteen on lisätty valvonta-automatiikkaa. Murskaimen sijoitteluun kiinnitetään huomiota varsinkin työajan ulkopuolella. Laitteistoja on kehitetty silmällä pitäen reaktiivisten tuotteiden käsittelyä.

Monenlaista ohjeistusta ja tiedottamista on harjoitettu, ja yleistä huolellisuutta korostetaan. Koulutusta on annettu sekä asiakkaille että omalle henkilökunnalle koskien jätteiden laatua ja lajittelua. Alkusammutusta on harjoitettu. Alkusammutusvalmius pidetään ajan tasalla, ja paloriskit on kartoitettu. Automaattisia sammutusjärjestelmiä on hankittu sekä tarvittaessa päivitetty.

#### 2.2.2.9 Syttymissyyt ja riskitekijät

Yleisimpinä syttymissyyinä jätteenkäsittelylaitosten tulipaloissa Suomessa pidetään helposti syttyviä aineita, kipinöitä, ja huolimattomuutta. Suurimmat riskit liittyvät palokuormaan laatuun ja määrään, jätteiden varastointiin ja sammuttamisongelmiin.

Jätteen mukana voi tulla palolähteitä, kuten syttyviä tai kuumia esineitä, kuuma tuhkaa tai kyteviä materiaaleja. Itsesytyvät tai helposti syttyvät aineet ovat tyypillinen syttymissyy. Itsesyttymisvaara liittyy mm. maali- ja lakkajätteisiin. Aineet voivat reagoida keskenään tai muiden kuormassa olevien materiaalien kanssa tuottaen syttymiseen tarvittavan lämmön tai syttyä käsittelylaitteen kuumenemisen johdosta. Reaktiivisista tuotteista mainittiin mm. akut, paristot ja öljyiset trasselit. Herkästi syttyvät nesteet ovat vaarallisia etenkin hyvin palavan jakeen, kuten energiajakeen tai hakkeen, joukossa. Jätteet ovat niin heterogeenisiä, että on erittäin vaikea valvoa mitä kuormissa on. Moniin ongelmajätteisiin liittyy itsesyttymis- tai räjähdysvaara, ja niiden palaessa voi vapautua myrkyllisiä savukaasuja. Eri jakeiden sisältämät lisäaineet ja niiden mahdolliset syttymisherkkyydet voivat olla vaikeita tietää. Kotimaasta ja ulkomailta tulevat käytetyt kemikaalit ovat esimerkki hankalasti määritettävästä jakeesta, etenkin jos lähetyksen tiedot ovat puutteelliset. Toisaalta asiakkaan antama tieto ei ole aina luotettavaa. Käsitteilyyn soveltumattomien jätejakeiden päätyminen prosessiin voi olla riskialtista.

Palokuormat laitosten sisällä tai rakennuksen välittömässä läheisyydessä voivat olla suuria. Varastokasat ovat isoja ja usein lähellä toisiaan. Itsestään syttyviä kohteita saatetaan sijoittaa lähelle muuta palavaa materiaalia. Jätteiden pitkäaikainen varastointi lisää mm. itsesyttymisriskiä. Pöly ja epäsiisteys lisäävät syttymisherkkyyttä. Pölyä tulee paljon kuivajätteen käsittelyssä ja murskauksessa.

Kaatopaikkakaasu voi syttyä palamaan jätteenkassa esimerkiksi kuuman tuhkan tai tupakan vuoksi. Vahingot saattavat olla mittavia, mikäli tulipalo tapahtuu kaatopaikkakaasun keräysjärjestelmässä. Sekajätteenkat, hake- ja energiajakekat voivat syttyä samoin tupakasta, tai lasijäte voi synnyttää polttopisteen. Loppusijoitusalueen syttyminen, palon leviäminen laajalle alueelle ja metsäpalo mainittiin myös suurina riskitekijöinä.

Työkoneista lähtevät tai huolto- ja korjaustoiminnassa syntyvät kipinät aiheuttavat tulipaloja osuessaan lähellä sijaitsevaan jätteeseen. Murskaimet ja tulityöt mainittiin monissa vastauksissa potentiaalisena kipinälähteenä. Erilaisten puristimien tai murskainten toiminnassa muodostuva kitka voi johtaa työkoneen syttymiseen jälkilämmöstä. Jos murskaan joutuu metalleja, ne kuumenevat kitkan vaikutuksesta ja irtautuessaan saattavat pudota polttojakeen sekaan. Kitkalämmöstä aiheutuva palo on vaarallinen etenkin, jos se tapahtuu työpäivän jälkeen kun työntekijät ovat poistuneet paikalta. Tyypillinen syytymissy ovat laiteviat, joita edesauttaa riittämätön laitteiden huolto ja puhdistus.

Yleinen huolimattomuus, tietämättömyys, välinpitämättömyys ja varomattomuus jätteen käsittelyssä nähdään riskitekijänä sekä laitoksilla että asiakkaiden toiminnassa. Esimerkiksi puutteellisen lajittelun vuoksi jättejakeeseen voi joutua siihen soveltumatonta jätettä, mikä syttyä käsittelyn yhteydessä tai varastoinnin aikana palamaan. Inhimillisen erehdyksen riski on aina olemassa. Herkästi syttyvien aineiden säilytyksessä ja käsittelyssä tapahtuu vahinkoja, samoin rakennusten ja laitosten kunnossapidossa. Varomattomasti tehdyt tulityöt aiheuttavat kipinävaaran. Alueella käyvien henkilöiden välinpitämättömyys (esim. kuljettajien tupakointi merkitsemättömillä paikoilla), asiattomat liikkujat, huolimaton tulenkäsittely ja ilkivalta aiheuttavat ongelmia, eikä valvonta ole riittävän tehokasta.

Sammuttamisen yhteydessä veden saanti ja riittävyys voi olla ongelma. Alkusammutusvalmiutta ei välttämättä ole arvioitu oikein. Vesipostien toimivuuden varmistaminen saatetaan laiminlyödä ja alkusammutuskaluston määrä alimitoitaa. Automaattisten palo-ilmoitin-, sammutus- ja pölynpoistojärjestelmien puuttuminen lisää riskiä. Jos tulipalot yritetään sammuttaa itse, voi se johtaa myös siihen että pelastuslaitoksen hälyttäminen viivästyä. Sammutuksen viivästyessä palo voi ehtiä levitä laajalle. Vaikka teoriatietaa olisi paljon, eivät työntekijät välttämättä toimi tosi tilanteessa rationaalisesti vaan voivat valita esimerkiksi väärät alkusammutuslaitteet. Koulutusta ja harjoituksia ei kaikilla toimipakoilla järjestetä tarpeeksi. Tilojen ahtaus lisää palon leviämisenriskiä ja vaikeuttaa sammuttamista.

## 2.2.2.10 Jätteenkäsittelylaitosten paloturvallisuustaso Suomessa

Arviot jätteenkäsittelylaitosten paloturvallisuudesta Suomessa vaihtelivat heikosta hyvään. Neljäsosalla ei ollut asiasta mielipidettä. Paloturvallisuuden arvioitiin parantuneen tällä vuosikymmenellä, mutta parantamisen varaa olisi vielä monen mielestä. Esimerkiksi ennakkovarautuminen on puutteellista. Tulipalojen uutisointia pidettiin jonkinlaisena mittarina. Koska suurista jätelaitosten tulipaloista uutisoidaan harvoin, päätteli yksi vastaaja tämän perusteella että paloturvallisuus olisi ”ilmeisen hyvällä tasolla”. Toisen näkemyksen mukaan taas on ”paljon palanut, voisi verrata entisajan sahoihin”.

## 2.2.2.11 Paloturvallisuuden parantaminen

Jätteenkäsittelylaitosten paloturvallisuuden parantamiseksi yritykset ehdottavat koulutuksen lisäämistä, sammutusvalmiuden nostamista ja työtapojen kehittämistä. Kouluttaminen nähtiin hyvin keskeisenä vaikutuskeinona. Monipuolinen valistus, neuvonta, tiedottaminen ja asennekasvatus olisivat tarpeen sekä henkilöstön että asiakkaiden osalta. Jos jätteenkäsittelylaitoksien riskitekijöitä ei tiedetä tai ymmärretä, voivat paloturvallisuudesta annetut ohjeet jäädä helpommin noudattamatta. Tietoja ja kokemuksia tulisi jakaa laitosten välillä, jotta riskit saataisiin kaikkien tietoisuuteen. Henkilökunnan koulutus tulisi olla jatkuvaa ja riskien kartoitus säännöllistä. Koulutuksella tarkoitetaan tässä sekä tiedon lisäämistä että ensiapu- ja alkusammutuskoulutusta ja pelastusharjoituksia. Ohjeistuksen tulisi olla ajantasaista ja laitoksen pelastussuunnitelma pitäisi käydä henkilökunnan kanssa läpi säännöllisesti. Yhteistyö pelastuslaitoksen kanssa nähtiin olennaisena osana koulutusta ja neuvontaa. Palokuormaa ja riskejä olisi hyvä tarkastella ja paloturvallisuusasioita kerrata yhdessä pelastuslaitoksen kanssa. Laitoksen suunnitteluvaiheessa on huomioitava pelastus- ja sammutustiet sekä sammutusveden saanti eri tilanteissa. Tarvetta voisi olla jätteenkäsittelylaitoksille räätälöidylle koulutukselle.

Alkusammutusvalmiutta tulisi parantaa ja sammutuskapasiteettia nostaa. Tositilanteessa voi olla hyötyä siitä, että alkusammutusvälineet on listattu ja merkitty pelastussuunnitelmassa olevaan karttaan. Automaattiset paloilmoitin- ja sammutusjärjestelmät sekä erilaiset ilmaisimet mainittiin etenkin kierrätyslaitosten vastauksissa. Riskikohteiden automaattista valvontaa ja suojausta (esimerkiksi murskaimen lämpötilaseuranta ja integroitu sammutusjärjestelmä) pitäisi lisätä. Laitoksille voisi perustaa sammutusryhmiä. Tehdaspalokunta toimii vastausten perusteella vain yhdellä jätteenkäsittelylaitoksella.

Jätteiden vastaanottokäytäntöjä ja työtapoja on kehitettävä niin, että palovaara saadaan minimoitua. Kuormantarkastusta ja valvontaa voisi tehostaa. Jätejakeita ei tulisi sekoittaa keskenään, ja palava jäte pitäisi ohjata jätteenpolttolaitoksiin. Oikeat työtavat, laitteiden riittävä huolto ja siivouksen lisääminen parantavat myös paloturvallisuutta. Jatkuva kameravalvonta, sekä tarkempi seuranta öisin ja viikonloppuisin nähtiin tarpeelliseksi.

### 2.2.2.12 Tulipalojen raportointi

Lähes kaikilla laitoksilla raportoidaan tapahtuneet tulipalot. Raportoiminen voi olla vain sisäistä tai myös ulkopuolisille tahoille suunnattua. Muita tahoja, joille tulipalot yleensä raportoidaan, ovat ympäristökeskus ja alueelliset ympäristöviranomaiset sekä muut lupaviranomaiset. Jotkin yritykset tiedottavat suuremmista tulipaloista myös lehdistölle. Raportointi tehdään joko jokaisesta tulipalosta erikseen tai kootusti vuosittaisessa ympäristöraportissa. Yrityksen oma ympäristökäsikirja tai ympäristölupa voi asettaa tarkemmat vaatimukset, joiden mukaisesti tulipalot raportoidaan. Joissakin laitoksissa tulipalot kirjataan laitoksen käyttöpäiväkirjaan.

## 2.2.3 Pelastuslaitokset

### 2.2.3.1 Yleistä

Pelastuslaitoksille lähetettiin kysely, jonka kysymykset ovat nähtävissä liitteessä A. Kyselyssä pyydettiin ilmoittamaan, kuinka monta vakavaa jätteenkäsittelylaitoksen tulipaloa pelastuslaitoksen alueella oli sattunut vuoden 2004 alun jälkeen ja kuvailemaan lyhyesti nämä tulipalot. Lisäksi kartoitettiin pelastuslaitosten näkemyksiä koskien jätteenkäsittelylaitosten paloturvallisuutta Suomessa. Pelastuslaitoksia pyydettiin kertomaan, tekevätkö ne alueellaan sijaitsevien jätteenkäsittelylaitosten kanssa yhteistyötä ja kuvailemaan, millaista yhteistyötä on tehty. Lisäksi pyydettiin arvioita Suomen jätteenkäsittelylaitosten paloturvallisuustasosta yleisesti sekä niiden suurimmista paloturvallisuusongelmista. Lopuksi kysyttiin, millainen jätepallo nähdään pelastuslaitoksen kannalta suurimpana uhkana ja mitkä ovat tyypillisiä sammuttamisongelmia.

Kysely lähetettiin kaikille aluepelastuslaitoksille (22 kpl), joista 17 vastasi. Yhteensä saatiin 19 vastausta.

### 2.2.3.2 Tapahtuneet tulipalot

Vastauksien perusteella koko maassa oli tapahtunut vuodesta 2004 lähtien 39 vakavaa jätteenkäsittelylaitoksen tai kaatopaikka-alueen tulipaloa. Joillain alueilla vakavia paloja ei ollut yhtään, ja enimmillään tulipaloja ilmoitettiin olleen kymmenkunta. Yhdeltä pelastuslaitokselta saatiin vastauksia useammalta henkilöltä, jotka ilmoittivat hieman toisistaan poikkeavia lukumääriä. Pienempien syttymien määrää ei kysytty, mutta seitsemän pelastuslaitosta ilmoitti ne omatoimisesti. Pieniä syttymiä raportoitiin olleen yhteensä 85 kpl. Suurin osa pienistä syttymistä oli kaatopaikoilla tapahtuneita sekajätteen, hakkeen tai energiajakeen penkka- ja kasapaloja. Taulukkoon 2 on koottu tietoja ilmoitetuista tulipaloista.



Taulukko 2. Pelastuslaitosten ilmoittamat vakavat tulipalot.

<i>Jättemateriaali tai kohde, josta tulipalo alkoi</i>	<i>Palojen lkm</i>	<i>Syttymissy</i>
Paperi	5	Tekninen vika tai laitteen ylikuumeneminen Kipinä Ei tietoa / ei arvioitu
Hake	1	Itsesyttyminen
Energiajäte (sis. uusiopolttoaineumat ja pakkausjätteet)	9	Tekninen vika tai laitteen ylikuumeneminen Kuuma tuhka Isku tai kipinä Itsesyttyminen Ei tietoa / ei arvioitu
Kumi	1	Ei tietoa / ei arvioitu
Sähkö- ja elektroniikkaromu	1	Tuhopoltto
Kiinteä ongelmajäte	2	Räjähdyk Kipinä
Sekajäte	7	Kipinä Ei tietoa / ei arvioitu
Kone tai laite	11	Tekninen vika tai laitteen ylikuumeneminen Oikosulku Kaaapelin löysä liitos Linjalle pudonnut valaisin Hankauslämpö Kipinä Ilotulite
Irtaimisto	1	Tekninen vika tai laitteen ylikuumeneminen
Jäteauto laitoksen alueella	2	Mahdollisesti tuhopoltto Ei tietoa / ei arvioitu

Suurin osa vakavista tulipaloista oli saanut alkunsa laitteen, kuten murskaimen tai kuljettimen vioittumisesta tai tukoksesta. Joissakin tapauksissa palo oli levinnyt syttyneestä laitteesta lähistöllä olleeseen jättemateriaaliin tai irtaimistoon. Tamppauskoneesta tai paalaimesta lähtenyt kipinä oli syynä useassa paperi- ja sekajätteen tulipalossa. Tyypillisiä energiajätepalojen syitä ovat itsesytyvät aineet tai jätteeseen sekoittunut kuuma tuhka. Raportoiduista paloista useimmat olivat pienehköjä sekä sammuttamisen kestolla että vahinkojen suuruusluokassa mitattuna. Pisin paloaika oli suuren hakekasan (80 000 m<sup>3</sup>) palossa, joka kesti viikon ajan. Suurin taloudellinen vahinko, arviolta 10 milj. €, aiheutui biojätelaitoksen palosta. Laitos tuhoutui palossa kokonaan. Yhden ongelmajätteen palon ilmoitettiin aiheuttaneen kierrätyslaitoksen työntekijälle vammoja.

Vastauksissa tuotiin myös esille jätteenkuljetusautoissa sattuneet tulipalot, joissa jäteauton kuorma syttyi palamaan ajon tai tyhjennyksen aikana. Yhdessä tapauksessa jäteauton pakoputki oli käyttövirheen vuoksi kuumentanut jätettä niin, että se alkoi savuta. Jäteauton palo aiheuttaa suuren riskin erityisesti taajama-alueilla.

### 2.2.3.3 Yhteistyö jätteenkäsittelylaitosten kanssa

Suurimmalla osalla pelastuslaitoksista on yhteistyötä alueellaan sijaitsevien jäte- ja kierrätyslaitosten kanssa. Tyypillisimpiä yhteistyömuotoja ovat mm. palotarkastukset (yleiset ja jälkipalotarkastukset) sekä uudisrakentamisen ohjaus ja tutustumiskäynnit. Tutustumiskäyntejä tehdään sekä uusiin laitoksiin että laitoksilla tapahtuneiden muutosten jälkeen. Paikoin tarkastus- ja tutustumiskäynneille otetaan mukaan myös kunnan ympäristötarkastaja. Osa pelastuslaitoksista on järjestänyt alkusammutus- ja turvallisuuskoulutusta. Onnettomuustilanteista järjestetään omia tai yhteistoimintaharjoituksia jätteenkäsittelylaitosten alueilla. Neuvontaa ja ohjeistusta annetaan pelastus- ja valmiussuunnitelmien laadinnassa, ongelmajätteiden käsittelyssä ja saastuneiden maa-alueiden käsittelyssä. Yhteistyötä tehdään myös alkusammutusvälineiden ja palonilmaisujärjestelmien valinnassa, turvajärjestelyissä ja jätteiden varastointitapoihin liittyen. Yhtenä esimerkkinä yhteistyöstä mainittiin kulkumahdollisuuksien turvaaminen ns. katastrofilähetysten vastaanottamisessa. Kriittisiin kohteisiin saatetaan varata valmiiksi sammutusvaahtoa. Yhteistyön laatu ja määrä vaihtelee kuitenkin suuresti alueittain. Joillain alueilla yhteistyötä ei ole lainkaan tai sen määrää ja laajuutta pidetään liian vähäisenä tarpeeseen nähden. Parhaimmillaan yhteistyötä alueen toimijoiden välillä pidettiin hyvänä ja toimintamuodot olivat monipuolisia.

### 2.2.3.4 Paloturvallisuustaso Suomessa

Pelastuslaitosten näkemykset jätteenkäsittelylaitosten paloturvallisuudesta Suomessa vaihtelivat suuresti; osa piti tasoa kohtalaisen hyvänä, toiset heikkona. Suurin osa vastaajista otti kantaa vain oman alueensa turvallisuustasoon, joillakin ei ollut asiasta mitään mielipidettä. Vanhoissa kohteissa todettiin olevan paljon puutteita, mutta uusien laitosten turvallisuuteen voidaan nykyään vaikuttaa jo kaavoitusvaiheessa, joten turvallisuustaso on paranemaan päin. Toisaalta EU:n myötä arveltiin ohjeistuksen muuttuneen liiankin tiukaksi, mutta lähinnä muiden vaatimusten kuin paloturvallisuuden suhteen. Paloturvallisuuden nähtiin parantuneen oleellisesti, kun jätehuoltoyritykset ottivat vastuun keräilyjärjestämisestä ja alueiden hoidosta. Jätteiden lajittelu on vähentänyt kaatopaikkapaloja.

### 2.2.3.5 Paloturvallisuus- ja sammutusongelmat

Suurimpina jätteenkäsittelylaitosten paloturvallisuusongelmina pidettiin palokuorman määrään ja laatuun liittyviä asioita ja jätteiden käsittelyssä käytettäviä laitteita. Jätteiden mukana tulevat palovaaralliset ja itsesytyvät aineet ja ongelmajätteet aiheuttavat eniten riskejä. Varastorakennuksissa voi olla paljon syttymislähteitä ja suuri palokuorma. Sähköiset koneet ja kuljettimet, joilla jätteitä käsitellään, voivat aiheuttaa syttymisriskin tukoksen tai vioittumisen seurauksena. Laitteita ei välttämättä huolleta ja puhdisteta riittävästi. Tiettyjen jätelajien, kuten paperin, käsittely tuottaa runsaasti pölyä, mikä lisää syttymisriskiä. Jätteiden käsittelyssä käytettävät laitteet voivat olla kotelorakenteisia, jolloin sammutusaineen pääsy palopesäkkeisiin on vaikeaa.

#### ***2.2.3.5.1 Siisteys, ilkivalta ja valvonta***

Jätealaa vaivaa huono siisteys, järjestys ja huolimattomuus, mikä heikentää paloturvallisuutta. Aitaamattomilla alueilla saattaa olla suuri määrä palavaa materiaalia, jolloin sekä tuhopolton mahdollisuus että palon leviämisen riskit ovat suuria. Ilkivaltaa on etenkin välivarastoilla ja avoimissa, lukitsemattomissa tiloissa, joihin sivullisilla on helppo pääsy. Valvomaton, miehittämätön laitos normaalin työajan ulkopuolella on riskialtis, sillä tuhot voivat olla mittavat, mikäli palo saa levitä rauhassa.

#### ***2.2.3.5.2 Työturvallisuus sammuttamisen aikana***

Pelastustoimen mahdollisuus toimia turvallisesti palokohteessa ei ole itsestäänselvyys. Monien jätelajien sammuttaminen on vaikeaa, ja tulipalossa syntyvät päästöt voivat olla vaarallisia. Jätteenkäsittelylaitoksen sisällä tapahtuvassa palossa riskejä aiheuttavat tasoterot, laitteet ja ahtaat paikat. Henkilökunta ei välttämättä tiedä, minkä laatuista jätettä laitoksella on, kuinka paljon ja missä se sijaitsee. Palavat aineet ovat riski, etenkin jos niistä ei ole tietoa. Penkoissa olevat väärät materiaalit, kuten ilotulitteet ja tuntemattomat kemikaalit, aiheuttavat vaaraa.

#### ***2.2.3.5.3 Ongelmajätepalot***

Ongelmajätepalot sisältävät suuria riskejä ja ovat hankalia sammuttaa, joten ne nähtiin merkittävänä uhkana pelastuslaitoksen kannalta. Paloaika voi olla pitkä ennen kuin kohteeseen päästään. Oikean sammutusmenetelmän valinta on harkittava tarkkaan. Tulipalossa ja sen sammuttamisessa voi syntyä vaarallisia tuotteita, tai keskenään kosketuksiin joutuvat aineet voivat pieninäkin määrinä aiheuttaa selvää haittaa sammuttajille tai muille lähellä oleville henkilöille.

#### **2.2.3.5.4 Päästöt ympäristöön**

Palon leviäminen lähimaastoon ja yleisesti ottaen kaikki palot taajamissa ovat aina riskejä. Ympäristön kannalta haitallisimpia ovat runsaasti savua tai myrkyllisiä kaasuja tuottavat palot, kuten autonrenkaiden tai muovien palot, joissa palokuorma on suuri ja perinteiset sammutusaineet (vesi ja vaahto) tehoavat huonosti. Tällöin tulipalosta ja sen sammuttamisesta aiheutuvat päästöt maaperään ja ilmaan saattavat olla hyvinkin merkittävät, kun joudutaan käyttämään suuria määriä sammutteita. Sammutusvesien ohjailu ja patoaminen niiden sisältäessä vaahtonesteitä ja palossa syntyneitä kemikaaleja on harvoin järjestettävissä, joten ne ohjautuvat maastoon tai yleiseen viemäriin.

#### **2.2.3.5.5 Penkka- ja kasapalot**

Tyypillinen hankalasti sammutettava palo on pitkäkestoinen, kytevä palo, joka on pureutunut syvälle suuriin penkkoihin, aumoihin, kasoihin tai paaleihin. Esimerkiksi renkaita ja haketta varastoidaan suuriin kasoihin ja paperista tehdään tiiviitä paaleja. Kasoissa voi olla myös sammuttamista hankaloittavia onkaloita. Suurten kasojen ja penkkojen raivaaminen kestää pitkään ja työ tapahtuu usein hyvin epähygieenisessä ympäristössä. Sekajätteet voivat nykyäänkin sisältää mitä vain. Paineilmalaitteiden kanssa työskentely on erittäin raskasta, etenkin kuumalla säällä. Tilannetta hankaloittaa, jos jätteen palaminen tuottaa runsaasti savua. Vesi ja vaahto tehoavat heikosti suuriin kasoihin, joten avuksi tarvitaan konekalustoa. Sammutusveden saatavuus on usein vaatimatonta kaatopaikoilla ja syrjäisissä kohteissa. Tulipalon alkuvaiheessa voi olla puutetta palokuorman raivaamiseen soveltuvasta kalustosta ja joskus raivauskaluston saaminen voi kestää hyvinkin pitkään. Kaivureiden kanssa työskentely on vaikeaa savun keskellä.

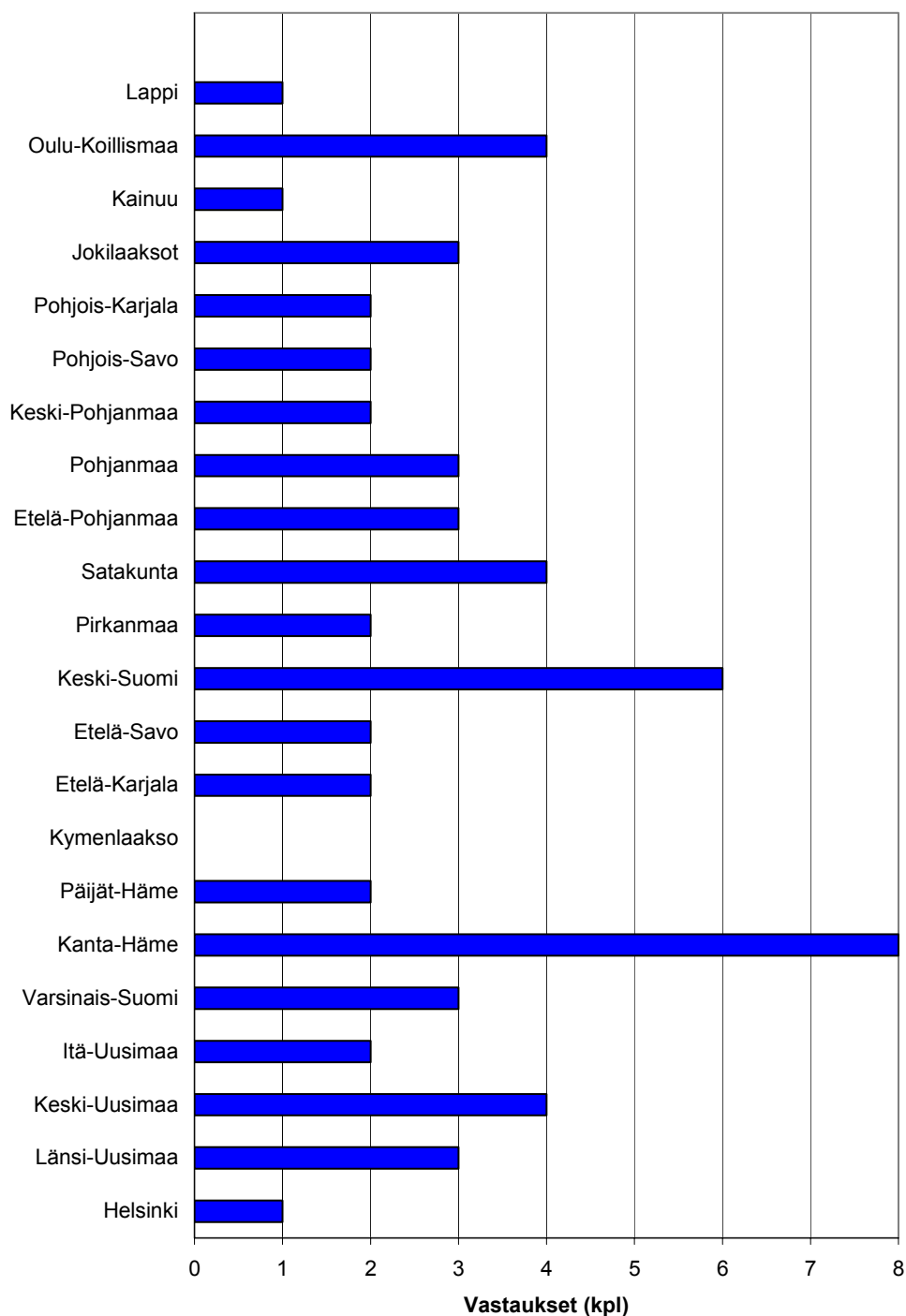
#### **2.2.3.6 Paloturvallisuuden parantaminen**

Syttymistäajuutta kaatopaikoilla pidettiin vieläkin turhan korkeana, vaikka parempaan suuntaan on menty. Jätepalojen vähentämiseen ja rajoittamiseen pelastuslaitokset tarjosivat monia keinoja. Eri jätteet pitäisi sijoittaa selkeästi rajatuille omille alueilleen ja niiden väliin tulisi jättää riittävän suuri turvaväli (4–8 metriä), jotta tulipalo ei pääse leviämään helposti. Pintapalot etenevät varsin nopeasti jos tuulee, kun taas tynnellä ilmalla palo pureutuu syvälle kasaan. Kasat tai aumat eivät saisi olla liian suuria, kuten eivät myöskään sisätiloihin sijoitetut jätemäärät suhteessa käytettävissä olevaan tilaan. Kaatopaikkapalot voivat olla laajoja ja osoitteiston hallinta haastavaa, sikäli kuin alueella edes on nimettyjä teitä. Tulipalon ilmoittajalla ei välttämättä ole tietoa, missä päin kaatopaikkaa hän on. Osoitteiston parantaminen voisi nopeuttaa pelastuslaitoksen pääsyä palokohteeseen. Toiminnanharjoittajilla ei ole aina riittävää valmiutta toimia tulipalon sattuessa, sillä yritykset luottavat pelastuslaitoksen toimintavalmiuteen. Esimerkiksi alkusammutuskalusto voi olla puutteellinen. Henkilökunnan tulisi tietää, mitä jätelajeja

alueella on, kuinka paljon niitä on ja missä ne sijaitsevat. Sammutusveden ja raivauskaluston saanti tulisi järjestää nykyistä paremmin. Mekaanisia jätteenkäsittelylaitteita tulisi huoltaa säännöllisesti. Mikäli paloilmalaitteita on käytössä, niiden luotettavuus pitäisi pystyä varmistamaan nykyistä paremmin, jotta välttyttäisiin virheellisiltä hälytyksiltä. Sammutuslaitteistoilla voitaisiin estää tai rajoittaa palovahinkoja sisätiloissa. Yhteistyössä pelastusalueiden ja jätelaitosten välillä olisi monessa tapauksessa parantamisen varaa.

#### **2.2.4 Yhteenveto kyselytutkimuksesta**

Kuvassa 3 on esitetty jätealan toimijoiden ja pelastuslaitosten vastausten jakautuminen ympäri Suomea eri pelastustoimen alueille. Vastauksia saatiin vähintään yksi kaikilta alueilta, Kymenlaakson aluetta lukuun ottamatta. Eniten vastauksia saatiin Kanta-Hämeestä ja Keski-Suomesta. Osalla yrityksistä on toimipaikkoja eri puolilla Suomea. Mikäli vastaus koski kaikkia yrityksen toimipaikkoja, on niistä valittu yksi kuvan 3 yhteenvetoon. Vastausten voidaan katsoa antavan yleiskuvan jätteenkäsittelylaitosten paloturvallisuudesta koko Suomessa.



Kuva 3. Vastausmäärät jaoteltuna pelastustoimen alueittain.

Pelastuslaitosten ja jätteenkäsittelylaitosten arvioimat tulipalojen määrät ovat samaa suuruusluokkaa, mutta saatujen vastausten tulkinnanvaraisuudesta ja kysymyksenasettelusta johtuen lukuja voidaan pitää lähinnä suuntaa antavina. PRONTOsta ei pystytä nykyisillä hakukriteereillä hakemaan jätteenkäsittelylaitoksissa sattuneita tulipaloja, joten todellista tulipalojen määrää ei voitu selvittää.

Paloriskit ja niiden pienentämiseen käytettävissä olevat keinot tunnistetaan yleisesti ottaen sekä pelastustoimen että jätealan yritysten parissa. Kaikki eivät kuitenkaan riskejä tunnista. Vastausten perusteella yritysten varautuminen tulipaloihin vaihtelee suuresti. Osa toimijoista on tehnyt paloturvallisuuden eteen hyvinkin paljon ja pyrkii aktiivisesti kehittämään toimintaansa. Paljon oli myös vastauksia, joista sai vaikutelman, että paloturvallisuuden eteen tehdään vain se, mikä on välttämätöntä.

Joukossa oli monia jäte- ja kierrätyslaitoksia, joilla ei ole ollut yhtään tulipaloa viimeisten viiden vuoden aikana ja toisaalta niitä, joilla tulipaloja oli ollut lukuisia. Tulipalojen määrä omalla laitoksella ei kuitenkaan ollut verrannollinen vastaajien käsitykseen paloturvallisuusriskeistä tai tulipaloihin varautumisesta. Laitoksilla, joissa ei tulipaloja ollut sattunut, varautuminen tulipaloihin saattoi olla joko hyvin monipuolista tai oli tähdätty vain minimivaatimusten täyttämiseen. Luonnollisesti käsiteltävien jätejakeiden tyyppi ja laitoksilla käytettävät koneet ja prosessit vaikuttavat laitosten riskitasoon.

Kysymys ”Mitä suojarusteita on henkilökunnan käytettävissä?” näytti, että yritysten välillä on selkeä hajonta tulipaloon varautumisessa. Parhaimmillaan yrityksellä on hyvinkin kattava valikoima suojaimia, jotka ovat käytettävissä tulipalotilanteessa. Suuri osa vastaajista jätti kohdan tyhjäksi tai vastasi ettei mitään suojaimia ole tulipalon varalta. Kuitenkin lähes kaikissa yrityksissä ainakin pienet tulipalot pyritään sammuttamaan itse.

## **2.2.5 Kyselytutkimuksessa esille nousseita paloturvallisuuden parannustoimenpiteitä**

Paloturvallisuutta parantavina toimenpiteinä tulisi kartoittaa alkusammutuskapasiteetin riittävyys sekä sisätiloissa että ulkoalueilla ja kiinnittää huomiota siihen, että sopivat alkusammutusvälineet on valittu kohteen mukaan. Alkusammutusvälineet olisi merkittävä pelastussuunnitelmassa olevaan karttaan. Palopostien määrän lisäksi on syytä tarkistaa, että letkujen pituus on riittävä ja että sammutusveden saatavuus on turvattu myös suurempien tulipalojen sammuttamisessa. Sammutusvesien talteenotto on toistaiseksi harvassa paikassa järjestetty, joten sen tarpeellisuus olisi syytä selvittää. Automaattisten hälytys- ja sammutusjärjestelmien asentaminen voi olla hyvä lisäturva useassa tapauksessa. Pelkkä asentaminen ei kuitenkaan riitä, vaan järjestelmiä on myös huollettava oikein. Raivauskaluston saatavuus on varmistettava tulipalotilanteen varalta.

Merkille pantavaa on, että huomattava osa yrityksistä ei ollut järjestänyt henkilökunnalle minkäänlaista koulutusta eikä kaikilla ollut myöskään kirjallisia ohjeita tulipalotilanteen varalta. Välineistä ei ole hyötyä, jos niitä ei osata käyttää. Jatkuva koulutus ja riskien säännöllinen kartoittaminen pitäisi olla osa yrityksen normaalia toimintaa. Säännöllinen harjoittelu on ensiarvoisen tärkeää, jotta tulipalotilanteessa osattaisiin toimia oikein.

Säännöllinen laitehuolto ja siivous ovat yksinkertainen keino riskien pienentämiseen. Helposti syttyviä materiaaleja ei tule sijoittaa laitteiden välittömään läheisyyteen. Pölyävien jakeiden käsittelytiloissa olisi hyvä olla pölynpoistojärjestelmä. Huolellisuus ja turvallisuusohjeiden noudattaminen kunnostustöiden, erityisesti tulitöiden, tekemisessä on tärkeää.

Jätteiden varastoimista liian lähelle toisiaan ja suurina kasoina tulee välttää. Kiertonepeuden nostaminen vähentää syttymisriskiä.

## **2.3 Sattuneita tulipaloja**

### **2.3.1 Keimolan rengasterminaalin palo 2.1.2004**

Vantaan Keimolassa sijaitsevassa rengasterminaalissa syttyi tulipalo iltapäivällä 2.1.2004 (Kiuru 2004, Korteniemi 2004, Mikkonen 2004). Palo arveltiin tahallaan sytytetyksi (Mikkonen 2004).

Aidatulla ulkoalueella (pinta-ala 12 000 m<sup>2</sup>) oli varastoituna käytettyjä renkaita 2–3 m:n korkuisissa patjoissa noin 8 000 m<sup>2</sup>:n alueella (Korteniemi 2004). Varastokirjanpidon mukaan alueella oli yhteensä noin 739 000 kg renkaita (Korteniemi 2004).

Ensimmäisen pelastusyksikön saapuessa kohteeseen tulipalon laajuus oli noin 900 m<sup>2</sup>, josta palo levisi kattaa lopulta noin 6 000 m<sup>2</sup>:n alueen (Korteniemi 2004).

Pelastuslaitos ei yrittänyt sammuttaa paloa. Kohteessa olleet voimavarat eivät olisi riittäneet pelastusviranomaisen arvion mukaan kohteen sammuttamiseen. Lisäksi veden saanti kohteeseen olisi ollut vaikeaa, sillä säiliöyksiköitä ei voitu sijoittaa riittävän lähelle ja kohteessa ei ollut palopostiverkostoa. Palon sammuttamiseen vaadittu vaahtonesteen määrä ylitti arvioiden mukaan lähialueilta saatavissa olleen määrän (Korteniemi 2004). Lisäksi sammutuksen joko vedellä tai vaahtonesteellä arvioitiin aiheuttavan todennäköisesti suurempia ympäristövahinkoja kuin sammuttamatta jättämisen (Kiuru 2004). Vettä käytettiin noin 80 m<sup>3</sup> palon rajoittamiseen ja renkaiden raivaamiseen osallistuneen kauhakuormaajan toiminnan turvaamiseen (Korteniemi 2004). Noin vuorokauden kuluttua palon syttymisestä palavan rengasmassan päälle ryhdyttiin ajamaan maata, tavoitteena tukahduttaa palo (Korteniemi 2004). Kohteeseen ajettiin maata 33 tunnin aikana noin 350 rekkakuormallista (Mikkonen 2004). Maanajon seurauksena palo sammui.

Palossa tuhoutui noin puolet rengasvarastosta (Mikkonen 2004). Tulipalosta aiheutui noin 66 000 €:n vahingot (Korteniemi 2004). Summa koostuu lähinnä sammutustyössä tarvittujen maamassojen siirrosta ja kuljetuksesta sekä raivauksesta ja siistimisestä



(Korteniemi 2004, Mikkonen 2004). Itse tuhoutuneen kierrätysmateriaalin arvoksi arviointiin n. 10 000 € (Korteniemi 2004). Liekit nousivat kymmenien metrien korkeuteen ja savukaasut levisivät pitkälle (Mikkonen 2004). Lähiseutujen asukkaat kärsivät lieivistä savu- ja hajuhaitoista (Korteniemi 2004). Pelastuslaitos jakoi tiedotteita lähiseuduille savun haitallisuudesta.

Pelastuslaitos arvioi, että tilanteen aikana vallinnut kylmä ja melko tyyni sää rajoitti ympäristövahinkoja merkittävästi. Myös palon leviämiskahva (esim. lähimetsiin) oli vuodenajan takia alhainen. Kohteen syrjäinen sijainti vähensi asuinalueille aiheutunutta haittaa. Suotuisan sään ansiosta palokaasut nousivat korkealle, mikä osaltaan vähensi päästöjen leviämisen aiheuttamaa haittaa (Korteniemi 2004).

### **2.3.2 Jätehallin palo Kajaanissa 14.3.2006**

Polttoaineeksi pilkottavan yhdyskuntajätteen murskauksessa syntynyt kipinä aiheutti mittavan jätehallin tulipalon Kajaanissa 14.3.2006 (Hyvärinen 2006). Havaittuaan palon henkilökunta kantoi murskaimen ulos teräsrakenteisesta hallista. Hallissa oli jätettä noin 200 tonnia (Hyvärinen 2006).

Pelastuslaitos sai palon hallintaan muutamassa tunnissa, mutta koko n. 1 000 m<sup>2</sup>:n suuruinen halli tuhoutui (Hyvärinen 2006).

### **2.3.3 Kierrätysmateriaaleja hyödyntävän tuotantolaitoksen palo Lappeenrannassa 16.5.2006.**

Tulipalo tuhosi 600 tonnia kierrätyspolttoainetta kierrätysmateriaaleja hyödyntävän yrityksen tuotantolaitoksella Lappeenrannassa 16.5.2006 (Saarinen 2006, Kanerva 2006). Tulipalo sai alkunsa tuotantolaitoksen piha-alueelle sijoitetusta energiaraaka-aineen murskaimesta. Murskaimella muutetaan energiajätettä kierrätyspolttoaineeksi (Saarinen 2006). Piha-alue oli kooltaan n. 50 m x 100 m, ja alueelle oli sijoitettu noin 3–4 m korkeisiin varastokasoihin noin 1 200 tonnia valmista tuotetta ja käsittelemätöntä raaka-ainetta (Kanerva 2006). Palon aikana puhalsi voimakas puuskittainen tuuli, joka vaikutti edistävasti palon leviämiseen.

Murskainta käyttänyt henkilökunta havaitsi palon syttymisen (Saarinen 2006) ja onnistui rajoittamaan paloa jauhesammuttimella (Kanerva 2006). Alkusammutustoimenpiteet eivät kuitenkaan riittäneet palon hallitsemiseen tai sammumiseen (Saarinen 2006).

Helsingin Sanomat (Saarinen 2006) raportoi energiajätteen palamisesta syntyneen sankkaa savua ja savupatsaan näkyneen useiden kilometrien päähän. Voimakkaan savunmuodostuksen takia pelastuslaitos kehotti viranomaistiedotteella savun alapuolisilla alueilla olevia ihmisiä siirtymään sivummalle tai suojautumaan sisätiloihin (Kanerva 2006).

Varsinainen sammutustyö käynnistyi 14 min kuluttua syttymästä (Kanerva 2006). Sammutustoimia vaikeuttivat suuri palokuorman määrä, voimakas savunmuodostus ja kova tuuli (Kanerva 2006, Saarinen 2006). Pelastuslaitos keskittyi tilanteen alussa estämään palon leviämisen viereisiin rakennuksiin ja ympäristöön (Kanerva 2006). Palon rajaamiseen ja sammutukseen käytettiin vesitykkeitä sekä järeitä työsuihkuja. Sammutusvesi saatiin kohteen sivustalla kulkevasta kaupungin jätevedenpuhdistamon purkuojasta. Tehollisen sammutustyön on arvioitu kestäneen noin 5 tuntia ja sammutusvettä käytetyn n. 2 500 m<sup>3</sup> (Kanerva 2006).

Tuhoutuneen alueen laajuus tilanteen lopussa oli n. 50 x 100 m (Kanerva 2006). Tontilla olleesta jätevarastosta tuhoutui näin ollen noin puolet. Alueella ollut kierrätysrakennus säästy (Saarinen 2006). Palo aiheutti yli 500 000 euron vahingot (Anon 2006a).

Tämän lisäksi runsas savunmuodostus aiheutti nokilaskeuman vieressä sijaitsevalle tehtaalle ja vaikeutti näin työskentelyä osassa tehtaan tuotantorakennuksia (Kanerva 2006). Pelastuslaitoksen arvion mukaan kaupungista pois päin puhaltaneen tuulen suunta oli suotuisa, vastakkainen tuulensuunta olisi voinut helposti levittää palon viereiselle tontille varastoituihin rengaskasoihin (Kanerva 2006).

Pelastuslaitoksen mukaan (Kanerva 2006) riskialttiiden tuotantolaitosten sijoittelussa tulisi huolehtia riittävästä turvaetäisyyksistä ympäröiviin toimintoihin. Tämän lisäksi riskiä voidaan alentaa syttymislähteitä poistamalla sekä mahdollistamalla palon rajoittaminen syttymispaikkaan. Tuotantokoneet voisi suojata esim. käsinlaukaistavilla sammutuslaitteistoilla (Kanerva 2006).

### **2.3.4 Paperivaraston palo Seinäjoella 15.6.2006**

Jätepaperivarastona ja jätteenkäsittelylaitoksena toimivassa hallissa syttyi tulipalo 15.6.2006 Seinäjoella (Anon 2006b–d). Paloa epäiltiin tahallaan sytytetyksi (Anon 2006c).

Noin 1 000 m<sup>2</sup>:n teollisuushalli, josta palo sai alkunsa, sisälsi jätepaperia. Palo levisi hallin rakenteisiin ja siitä edelleen hallin ulkopuolella säilytettyyn rakennusjätteeseen, puutavaraan ja muoviin, jota pihamaalla oli yhteensä tuhansia kuutioita (Anon 2006b).

Noin 1 000 m<sup>2</sup>:n teollisuushalli tuhoutui palossa kokonaan. Palon leviäminen viereisiin rakennuksiin saatiin estettyä. Arvioitua vahingot nousevat miljooniin euroihin (Anon 2006c). Jätepaperin lisäksi palanut muovi aiheutti sankan myrkyllisen savun, josta lähi-alueiden asukkaita varoitettiin hätätiedottein (Anon 2006d).

### **2.3.5 Rengaspinnoittamon palo 19.7.2006 Pernajalla**

Pernajassa sijaitsevassa rengaspinnoittamossa syttyi tulipalo 19.7.2006 (Anon 2006e–g). Pinnoittamo tuhoutui palossa täysin. Palossa tuhoutui satoja renkaita sekä arvokkaat pinnoituskoneet. Palaneessa hallissa oli runsaasti vanteella olevia kuorma-auton renkaita, jotka palon vaikutuksesta sinkoilivat useiden metrien päähän (Anon 2006f). Palosta aiheutui runsaasti vaaralliseksi luokiteltua savua, josta lähellä asuvia ihmisiä varoitettiin (Anon 2006e). Kohde sijaitsi harvaan asutulla maaseudulla (Anon 2006e), mutta silti kritiikkiä annettiin siitä, kuinka sivullisten annettiin altistua myrkyllisille savukaasuille (Anon 2006g). Ihmisiä ei evakuoitu palon tai savukaasujen takia. Sen sijaan läheinen maantie suljettiin liikenteeltä palopaikan kohdalta.

### **2.3.6 Palo ongelmajätelaitoksella 3.7.2007 Tuusulassa**

Tuusulan ongelmajätelaitoksella syttyi uhkaava tulipalo 3.7.2007. Tulipalossa paloi jäteöljyä ja maaleja, jotka palaessaan aiheuttivat myrkyllisiä savukaasuja. Savukaasut levisivät ympäristöön. Palon alussa kohteessa tapahtui useita räjähdyksiä (Karttunen 2007).

Pelastusviranomaisen raportoiman tiedon perusteella (PRONTO) kiinteistön automaattinen sammutusjärjestelmä laukesi palossa rajoittaen sitä. Palo saatiin nopeasti hallintaan (Karttunen 2007).

Ongelmajätteet tuottivat palaessaan myrkyllisiä savukaasuja, ja noin kymmenen ihmistä evakuoitiin sen vuoksi. Tapahtuneista vahingoista ei raportoitu tarkasti, mutta summat arvioitiin mittaviksi (Karttunen 2007).

### **2.3.7 Rakennusjätteen palo Turussa 5.2.2005 ja 29.3.2007**

Rakennusjätteitä sisältävä kookas jätekasa syttyi palamaan Turussa 5.2.2005 (Härkönen 2005, Anon 2005, Setälä 2005). Jätekasan koon arvioitiin olevan välillä 50 000–80 000 m<sup>3</sup>. Piha-alueella sijaitsevan auma oli kooltaan noin 20–40 m × 70–80 m ja kor-

keudeltaan 15–20 m (Härkönen 2005, Setälä 2005). Kasa sisälsi energiakäyttöön tarkoitettua haketta, josta noin 80 % on puuta ja loput muoviva, pahvia, paperia ja styroxia (Setälä 2005).

Navakka ja puuskittainen tuuli edisti palon leviämistä. Kytevä kasan sammuttaminen oli erittäin hankalaa. Pelastuslaitos hajotti kasa kauhakuormaajilla ja kaivinkoneilla ja pyrki sammuttamaan paloa suihkuttamalla vettä tulen yläpuolelta nostolavan ja puomitikkaiden avustuksella. Palopesäkkeisiin suihkutettiin vettä noin 3 000–5 000 l/min (Setälä 2005, Härkönen 2005).

Palo ei ollut vaarassa levitä viereisiin peltihalleihin, mutta jäte tuotti palaessaan huomattavan määrän savua. Lähistön asukkaita suositeltiin poistumaan kodeistaan savuhaittojen takia (Setälä 2005). Jätekasaa sammutettiin useita päiviä Anon 2005a, Malkamäki 2007).

Samaisessa paikassa syttyi tulipalo myös 29.3.2007, jonka sammuttaminen osoittautui vähintäänkin yhtä haasteelliseksi (Malkamäki 2007, Kuusela 2007, Backman 2007, Anon 2007). Tuolloin noin 50 m × 50 m × 15 m energiajakekan epäillään syttyneen itsestään palamaan kasan sisältä ja aiheuttaneen sankasti savuavan tulipalon (Malkamäki 2007). Palo jatkoi kyttemistään yli kaksi viikkoa (Anon 2007, Backman 2007, Kuusela 2007) levittäen ympäristöön savua ja pahaa hajua. Kasteltuaan kasa parin viikon ajan pelastuslaitos vaati kytevä kasan purkamista ja siirtämistä muualle (Kuusela 2007). Myös lähiseutujen asukkaat valittivat palavan jätteen hajun aiheuttamista haitoista (Kuusela 2007). Lopulta 5 000 tonnin jätekasa päätettiin purkaa ja siirtää muualle (Backman 2007).

Tapaukseen puuttui myös Turun kaupungin ympäristönsuojelutoimisto, joka vaati yritykseltä selvitystä palon ympäristövaikutuksista sekä alueelle varastoidun polttoaineen ja jätteen määristä.

### **2.3.8 Paperivaraston palo Seinäjoella 3.6.2008**

Sahauksen yhteydessä syntynyt kipinä aiheutti räjähdysmäisen tulipalon 3.6.2008 aamupäivällä lajittelukeskuksen tuotantotilassa. Palo kehittyi niin voimakkaasti, etteivät työntekijät voineet tehdä mitään (Koivunen 2008). Työntekijät eivät ehtineet sulkea hallin ovia ja koska tapahtumahetkellä tuuli voimakkaasti, pääsi tuli leviämään myös toiseen halliin. Palo levisi alkuvaiheessa myös lähimaastoon, mutta maastopalo saatiin sammuttettua ongelmitta. Ensimmäisenä syttyneen hallin kattorakenteet romahtivat vajaan vartitunnin kuluttua (Koivunen 2008). Sanomalehti Ilkka raportoi, että palo saatiin hallintaan ilmapäivällä, mutta jälkisammutus ja raivaustyöt jatkuivat seuraavaan aamuun asti (Anon 2008).

Voimakkaan savunmuodostuksen vuoksi annettiin viranomaistiedote, jossa ihmisiä kehoitettiin pysymään sisällä, sulkemaan ovet ja ikkunat sekä sammuttamaan ilmanvaihtolaitteistot. Lähimpien kiinteistöjen ihmisiä kehoitettiin poistumaan toimitiloistaan (Koi-vunen 2008).

Tuli tuhosi molemmat varastohallit lähes täydellisesti ja halleissa säilytetyt 511 tonnia paperia. Piha-alueella paloi 50 tonnia paperia ja 31 tonnia muovia. Henkilövahinkoja ei tullut (Anon 2008). Raivauksessa tarvittiin avuksi kalustoa, kuten nostolava-autoja, puu-tavaran kuorma-auto sekä kaivinkoneita, joilla mm. poistettiin kattopellit syttyneiden paalien päältä.

### **2.3.9 Kompostointilaitoksen palo Joutsenossa 21.6.2008**

Joutsenossa sijaitseva kompostointilaitos tuhoutui tulipalossa lähes kokonaan 21.6.2008. Palossa tuhoutuivat laitosrakennuksen puuosat 3 500 m<sup>2</sup>:n alalta (Anttonen & Onali 2008). Tapaukseen ei uskota liittyvän rikosta, koska valvontakameroiden mukaan alueella ei ole ollut tapahtuma-aikaan ylimääräistä liikettä (Anttonen & Onali 2008).

Palokunta saapui paikalle kahden aikaan iltapäivällä, jolloin laitoksen kattorakenteet olivat jo kauttaaltaan tulella (Blomqvist & Sjöholm 2008). Paloa sammutti yhteensä yli kaksikymmentä pelastusyksikköä, mutta pelastuslaitoksella ei ollut mahdollisuuksia pelastaa rakennusta. Pelastuslaitos sai jälkisammutustyöt valmiiksi seuraavana iltana kello kymmeneltä. Noin 3 000 m<sup>2</sup>:n suuruisen laitoksen katosta ei jäänyt mitään jäljelle, ja sisätilat vaurioituivat pahasti. Laitteisto ja sähköjärjestelmät tuhoutuivat kokonaan, mutta kenttärakenteet säilyivät vahingoittumattomina.

Laitoksessa ei tulipalon syttyessä ollut työntekijöitä. Kukaan ei loukkaantunut palossa, mutta aineellisten vahinkojen arvioitiin olevan useita miljoonia euroja. Tulipalo nostatti ilmaan sankkaa, mustaa savua (Blomqvist & Sjöholm 2008). Palo ei ilmeisesti levittänyt myrkyllisiä kaasuja, sillä palava materiaali oli lähinnä puuta ja sähköjohtoja. Etelä-Karjalan pelastuslaitos arvioi, ettei jätekentän syttymisestä ollut vaaraa koska maasto oli kostea. Tuuli puhalsi pohjoiseen jätekentälle päin, joten lähistöllä olevat laitoksen etelä-puolella sijaitsevat rakennukset eivät olleet vaarassa.

## 3. Jätteiden palaminen

### 3.1 Yleistä

Jätteiden sekä jäteperäisten kierrätysmateriaalien palaminen jätekeskuksissa tai jätteiden loppusijoituspaikalla on hyvin epätoivottu prosessi. Tästä huolimatta jätepaloja arvioitiin tapahtuvan Suomessa 1990-luvun alkupuolella noin 380 kpl vuodessa (Ettala et al. 1996). Jätteen loppusijoittamiseen käytettyjen kaatopaikkojen määrä on kuitenkin vähentynyt kymmenen viime vuoden aikana huomattavasti. Vuonna 1998 tavanomaisen yhdyskuntajätteen sijoittamiseen tarkoitettuja kaatopaikkoja oli vielä käytössä 268 kpl, mutta vuoteen 2004 mennessä niiden määrä oli enää 86 kpl (SYKE, 2008). Uudempaa tietoa tarkasta jätepalojen määristä loppusijoituspaikoilla ei juuri ole saatavissa.

Jätepalojen syttymissyiksi on oletettu mm. Ruotsissa 1990-luvulla tehdyissä tutkimuksissa lähes ainoastaan tahallisia tihutöitä, mutta nykyisin uskotaan suuren osan jätteen loppusijoituspaikalla syttyvistä paloista saavan alkunsa itsestään esimerkiksi lasin, kiuvan materiaalin ja auringon yhteisvaikutuksesta (Lönnermark et al. 2008). Jätepalon syttyminen voi myös tapahtua esimerkiksi normaalisti jätteiden käsittelyyn käytetyn työkoneen aiheuttamasta kipinästä tai jätteen loppusijoituspaikan rakenteiden rakenus/huoltotöistä. Lisäksi osa paloista syttyy työntekijän huolimattomuudesta, kuten tupakoinnista. Loppusijoituspaikan kasaan saattaa joskus joutua toistensa kanssa reagoivia tai itsestään syttyviä kemikaaleja, jotka aiheuttavat palon. Jätteen loppusijoituspaikan kasan sisällä olevissa hapettomissa olosuhteissa anaerobisesti hajoava orgaaninen talousjäte muodostaa aina palavaa ja herkästi syttyvää pääosin metaanista ja hiilidioksidista koostuvaa kaatopaikkakaasua. Kaatopaikkakaasua voi syttyä edellä mainituista kipinöistä aiheuttavista toimenpiteistä, mutta myös pelkästään siitä, että kasaan pääsee jostain syystä ilmaa. Hapen vaikutuksesta bakteeritoiminta kiihtyy ja jätekasaan muodostuu ”kuumia pisteitä”, jotka sytyttävät helposti niiden kanssa kosketuksiin joutuvan palavan kaatopaikkakaasun (USFA 2002). RDF-kierrätyspolttoaineen varastointikasoissa olosuhteet voivat kosteuden, orgaanisen materiaalin ja hapen yhteisvaikutuksesta muodostua myös sellaisiksi, että polttoaineen orgaanisen materiaalin hapettuminen kiihtyy ja jätekasan lämpötila nousee reaktion myötä niin korkeaksi, että tapahtuu varastoidun polttoaineen spontaani itsestään syttyminen (Hogland & Marques 2003). Japanissa on tapahtunut jopa RDF-kierrätyspolttoainesiiilon räjähtäminen, joka johtui pelletöidyn RDF-kierrätyspolttoaineen itsestään syttymisestä ja epätäydellisten palokaasujen kerääntymisestä varastosiiloon ja kaasujen räjähdysmäisestä syttymisestä (Gao & Hirano 2006).

Jätepalojen tuottamat päästöt riippuvat suuresti palavista materiaaleista ja palojen olosuhteista. Suuri osa haitallisista päästöistä vapautuu ympäristöön savukaasujen mukana ilman kautta, mutta myös sammutusveteen on mahdollista kertyä palossa muodostuvia haitallisia yhdisteitä (Lönnermark et al. 2008). Lisäksi jäte sisältää jo valmiiksi useita

erilaisia ympäristömyrkyjä joita palo voi levittää ympäristöön jätteen palaessa (Chrysikou et al. 2008).

Yhdyskuntien tuottama sekajätteen määrä Suomessa jakautuu YTV:n vuonna 2004 tehdyn tutkimuksen mukaan lähes suhteessa 50/50 asumisen ja palvelualueiden kesken YTV:n toimialueella, joka käsittää Helsingin, Vantaan, Espoon ja Kauniaisten kunnat. Tämän tilanteen on arvioitu vastaavan myös muun maan tilannetta suurella todennäköisyydellä. Sekajätteestä pääosa sijoitetaan Suomessa pääasiassa jätteiden loppusijoituspaikoille, ja sekajätteen poltto energiaksi on vielä vähäistä verrattuna esimerkiksi Keski-Eurooppaan. Loppusijoituspaikoille sijoitettava yhdyskuntien sekajäte sisältää monia eri materiaaleja, kuten huomattavan suuren osan biohajoavaa keittiöjätettä ja puutarhajätettä, keräyspaperia, -pahvia ja kartonkia, muoveja, vaippoja ja muita hygieniatuotteita sekä puuta. Näin ollen jopa 89,3 % kerätystä yhdyskuntien tuottamasta jätteestä on polttokelpoista ja siten myös jätepalon sattuessa palavaa (YTV 2004). Lisäksi jätteen loppusijoituspaikalle loppusijoitetaan muun muassa rakennusjätettä. YTV:n 2004 tekemän jäte-tutkimuksen mukaan kotitalouksien sekajätteen laatu on taulukon 3 mukainen.

*Taulukko 3. Sekajätteen laatu pääkaupunkiseudulla (YTV 2004).*

<b>Kotitalousjätteen koostumus YTV:n alueella</b>	<b>Osuus (%)</b>	<b>Palavat (%)</b>
Keittiöbiojäte	25,2	25,2
Puutarha- ja muu biojäte	9,9	9,9
Pehmopaperi	2,9	2,9
Keräyspaperi, -pahvi ja kartonki	20,2	20,2
Muu paperi, pahvi ja kartonki	1,4	1,4
Muovit	13,4	13,4
Lasi	3,7	
Metallit	3,8	
SER	0,7	
Puu	2,8	2,8
Tekstiilit ja vaatteet	4,5	4,5
Vaipat ja kuukautissiteet	7,2	7,2
Sekalaiset pakkaukset	0,5	
Muu palava	1,8	1,8
Muu palamaton	1,3	
Sekalaiset jätteet (ei pakkauksia)	0,5	
Ongelmajätteet	0,2	
<b>Yhteensä</b>	<b>100</b>	<b>89,3</b>

Kokonaisuudessaan yhdyskuntien kaatopaikoille loppusijoitetaan noin 2,5 miljoonaa tonnia jätteitä vuodessa. Jätekertymä vuonna 2003 oli taulukon 4 mukainen. Sekajätteen koostumus on jätteen loppusijoituspaikassa hyvin monimutkainen, vaikkakin kotitalousjäte muodostaa suurimman osan yhdyskuntien jätteen loppusijoituspaikoille joutuvasta materiaalista yli 1,4 miljoonan tonnin kokonaismäärällään.

*Taulukko 4. Jätteiden sijoitus kaatopaikoille vuonna 2005, 1 000 tonnia (Mäenpää et al. 2006).*

<b>Kuvaus</b>	<b>Yhdyskuntien kaatopaikat</b>	<b>Teollisuuden kaatopaikat</b>	<b>Kaivosjätteet</b>	<b>Maan kaatopaikat</b>	<b>Yhteensä</b>
Kemiallisten yhdisteiden jätteet	3	700			703
Käytetyt öljyt	1	0			1
Kemiallisten valmisteiden jätteet	2	1			3
Kemialliset sakat ja jäännökset	9	134			143
Teollisuuden jätevesilietteet	37	263			299
Terveystieteiden jätteet	7	0			7
Metallijätteet	0	6			7
Paperi- ja pahvijätteet	0	1			1
Muovijätteet	12	0			12
Puujätteet	4	31			35
Käytöstä poistetut laitteistot	4	3			7
Eläinperäiset elintarvikejätteet	8	0			8
Muut elintarvikejätteet	19	1			20
Kasvijätteet ja lanta	7	0			7
Kotitalous- yms. jätteet	1 412	6			1 418
Sekalaiset materiaalit	137	84			220
Tavanomaiset lietteet	56	214			270
Luonnonmineraalien jätteet	50	118	21 520	4 354	26 042
Keinotekkoisten mineraalien jätteet	54	1 964			2 018
Sekalaiset rakennusjätteet	245	6			250
Polttojätteet	90	1 099			1 189
Metallien jalostuksen kuonat	2	752			754
Saastuneet maa-ainekset	348	1			348
<b>Yhteensä</b>	<b>2 505</b>	<b>5 383</b>	<b>2 1520</b>	<b>4 354</b>	<b>33 762</b>

Vaikka ongelmajätteille on järjestetty yleensä erilliskeräys, päätyy niitä aina pieniä määriä myös loppusijoituspaikoille sekajätteen seassa ja materiaaleihin sitoutuneena. Haitallisimpia yhdisteitä ovat niin kutsutut POP-yhdisteet (Persistent Organic Pollutant), jotka ovat erittäin hitaasti hajoavia, kulkeutuvat kauas ja kertyvät ja rikastuvat eliökehässä ja aiheuttavat vaikutuksia jo pienemmissäkin pitoisuuksissa ihmisen tervey-



delle ja luonnon eliöstölle. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus 2004/850/EY määrittelee pysyviksi orgaanisiksi yhdisteiksi 14 eri yhdistettä ja yhdisteryhmää, joihin kuuluvat plyklooratut bifenyylit (PCB), heksabromi-bifenyylit (HxBB), polyklooratut dioksiinit ja furaanit (PCDD/F), orgaanista klooria sisältäviä torjunta-aineita, kuten aldrini, klordaani, dieldriini, endriini, heptakloori, mireksi, toksafeeni, DDT (1,1,1-trikloori-2,2-bis(4-kloorifenyli)etaani), klordekoni, HCH-yhdisteet sisältäen lindaanin ja heksaklooribentseenin (HCB) (2004/850/EY).

Haitallisia jätteistä löytyviä yhdisteitä ovat esimerkiksi PCB-yhdisteet (Chrysikou et al. 2008). Euroopanlaajuisesti PCB-yhdisteiden päästömäärän ympäristöön on arvioitu olevan 600 tonnia vuodessa. Keskimäärin yhdyskuntajäte sisältää 0,01–0,6 ppm PCB-pitoisuuksia ja siksi jätteen loppusijoituspaikoille joutuu PCB:tä jätteen mukana noin 300 t/a. Hieman enemmän eli 304 t/a on arvioitu sijoitettavan vaarallisten jätteiden varastointiin erikoistuneille loppusijoituspaikoille (ENV.A.2/ETU/2004/0044). Koska suuri osa PCB:stä varastoituu normaalin talousjätteen mukana jätteen loppusijoituspaikalle, voivat loppusijoituspaikat toimia itsessään PCB-yhdisteiden lähteinä ympäristöön erityisesti jätepalon tapahtuessa (Ruokojärvi et al. 1995a). Kreikkalaisessa tutkimuksessa sekajätteen kaatopaikan PCB-pitoisuudet olivat luokkaa 399 µg/kg (dw, kuivapainossa) (Chrysikou et al. 2008).

PCDD/F-yhdisteiden vuosittainen päästömäärä ympäristöön on arvioitu Euroopan laajuisesti olevan noin 20 kg ja tästä päästöstä vain 20 % on ilmapäästöjen osuus. 80 % PCDD/F-yhdisteistä päätyy siis kiinteässä muodossa jätteiden loppusijoituspaikoille. Noin 65 % eli 13 kg tästä kiinteästä osasta sijoitetaan myrkyllisten erikoisjätteiden loppusijoitukseen ja 35 % eli 7 kg joutuu normaaliin talousjätteen loppusijoitukseen Euroopassa (ENV.A.2/ETU/2004/0044). Kaatopaikat voivat näin ollen toimia myös PCDD/F-yhdisteiden lähteinä ympäristöön.

## **3.2 Aikaisempia tutkimuksia**

### **3.2.1 Jätteiden palaminen**

Kierrätysmateriaalin ja jätepaalien palamisesta on tehty joitain tutkimuksia 2000-luvulla. Ruotsissa on tutkittu Kalmarin yliopiston tekniikan laitoksella mm. muovikalvolla paalattujen ja energiakäyttöä varten varastoitujen yhdyskuntajätepaalien palamista sekä niiden palaessaan tuottamia savukaasu- ja sammutusvesipäästöjä. Jätepaaleja poltettiin tutkimuksessa kontissa ja savukaasunäytteitä kerättiin konttiin rakennetusta savukaasupuhaltimella varustetusta poistokanavasta (Nammari et al. 2004, Hogland et al. 2003). Ruotsin tekninen tutkimusinstituutti ja Uumajan yliopisto ovat tehneet jätteenpolttotutkimuksen juuri tässä projektissa käytetyn testaustavan mukaisesti eli jätteenäyt-

teitä oli poltettu tutkimuksessa savukaasuja keräävän huuvan alla olevan vaa'an päällä ja savukaasunäytteet oli kerätty huuvan savukanavasta (Lönnermark et al. 2008). Polttestissä tutkittiin palamista syvältä kaatopaikan sisältä otetuilla kuutiomaisilla jätenäytteillä, jotta saataisiin tietoa kytevien kaatopaikkapalojen aiheuttamista PCDD/F-yhdisteiden, polyaromaattisten hiilivetyjen (PAH) ja heksaklorobentseenin (HBC) päästöistä kotitalousjätteen loppusijoituspaikkojen paloissa (Lönnermark et al. 2008). Erityisesti jätteen loppusijoituspaikalla tapahtuneen palon vaikutuksia kaatopaikan suodatusvesille on tutkittu Norjassa (Øygard et al. 2005). Lisäksi itse kaatopaikkajätteen syvällä kasassa tapahtuvaa palamista on tutkittu Suomessa aiemmin vuonna 1996 (Ettala et al. 1996). Kaatopaikkapalojen pintapalojen savukaasupäästöjen PCDD/F-yhdisteiden ja orgaanisten yhdisteiden pitoisuuksia on tutkittu Kuopion yliopiston ympäristötieteiden laitoksen ja Ettala & Rossi Avoimen yhtiön tekemissä polttotesteissä vuonna 1995 (Ruokojärvi et al. 1995a, Ruokojärvi et al. 1995b). Suuren kaatopaikkapalon PAH- ja PCB-päästöjä ympäristöön on tutkittu Kreikassa Tessalonikian yliopiston tutkimuksessa (Chrysikou et al. 2008). Braunschweigin teknillinen yliopisto ja Jordanian yliopiston kemian laitos ovat tutkineet Jordaniassa kaatopaikkapaloja ja palojen PAH-, PCDD/F-yhdisteiden sekä raskasmetallien päästöjä ympäristöön (Wichmann et al. 2006).

### 3.2.2 Savukaasupäästöt

Väliavarastoidun tai loppusijoitetun jätteen/kierrätysmateriaalin palaessa voi muodostua hyvin suuriakin savukaasupäästöjä. Tällaisissa tilanteissa palaminen on aina epätäydellistä, ja palotilanne voi vaihdella huomattavastikin eri paikoissa. Lisäksi jäte voi sisältää itsessään jo pieniä määriä haitallisia ympäristömyrkyjä, jotka leviävät savukaasun mukana helposti ympäristöön.

Yleisimpiä haitallisia yhdisteitä, jotka pääsevät ilmaan jätepaloissa savukaasujen mukana, ovat polyaromaattiset hiilivedyt (PAH), polyklooratut bifenyylit (PCB), klooribentseeni ja kloorifenolit (Ruokojärvi et al. 1995a). Lisäksi jätepalojen savukaasuissa on niissä muodostuvia supermyrkyjä, kuten polykloorattua dioksiineja ja furaaneja (PCDD/F) (Ruokojärvi et al. 1995b).

Savukaasupäästöt vaihtelevat huomattavasti sen mukaan, tapahtuuko palo pinnalla tai syvällä jätteen loppusijoituspaikan sisällä. Pintapaloissa lämpötilat ovat suhteellisen alhaisia, ja siksi savu on vaaleaa ja sisältää paljon epätäydellisen palamisen yhdisteitä. Savussa on myös ärsyttäviä yhdisteitä, kuten orgaanisia happoja (USFA 2002). Pintapalossa muodostuu huomattavasti enemmän savua ja muodostuvat haitalliset yhdisteet pääsevät helposti suoraan ilmaan, kun taas syvällä tapahtuvassa palossa palokaasut suodattuvat läpi ylempien jätekerrosten ja osa haitallisista yhdisteistä tiivistyy välikerrokseen (Lönnermark et al. 2008, USFA 2002).

Jätepalojen aiheuttamat savukaasupäästöt ympäristöön voivat olla huomattavan suuria verrattuna esim. jätteen polttoon kontrolloidusti jätteenpolttolaitoksissa. Jätteenpolttolaitosten savukaasujen päästörajat määrittelee Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2000/76/EY jätteenpoltosta. Direktiivi määrittää savukaasulle PCDD/F-päästörajaksi 0,1 ng toksisuusekvivalenttia/m<sup>3</sup> savukaasua laitoksille, jotka polttavat kiinteää yhdyskuntajätettä yli kolme tonnia tunnissa, 0,5 ng toksisuusekvivalenttia/m<sup>3</sup> laitoksille, jotka polttavat sairaalajätettä yli tonnin tunnissa, ja 0,2 ng toksisuusekvivalenttia/m<sup>3</sup> laitoksille, jotka polttavat vaarallista jätettä yli tonnin tunnissa. Lisäksi jätteenpoltosta määrätään hiukkasten päästöjen raja-arvot, jotka ovat 10 mg/m<sup>3</sup> vaarallisen ja sairaalajätteen polton osalta, ja oikeudellisesti sitovat elohopeapäästöjen raja-arvot, jotka ovat 0,05 mg/m<sup>3</sup> vaarallisen jätteen polton ja 0,08 mg/m<sup>3</sup> yhdyskuntajätteen polton osalta (2000/76/EY).

1990-luvun alun arvioiden mukaan Ruotsissa tapahtuneitten kaatopaikkapalojen dioksiinipäästöt ilmaan olivat tuolloin 2,8–30 g/a (TEQ) (UNEP 1999). Uudempien arvioiden mukaan tulipalojen, auto- ja kaatopaikkapalojen sekä metsäpalojen yhteenlaskettu dioksiinipäästö on Ruotsissa 0,5–1,4 g (TEQ). Polyaromaattisten hiilivetyjen (PAH) ja haihtuvien hiilivetyjen (VOC) päästöt näistä paloista ovat arviolta 2–12 tonnia ja 13–200 tonnia (Blomqvist et al. 2007). Tähän verrattuna esimerkiksi Ruotsin jätteenpolttolaitosten vuotuiset yhteenlasketut PCDD/F-yhdisteiden päästöt ilmaan olivat vuonna 2004 huomattavasti pienemmät eli arvioilta 1,1 g/a (TEQ) (Lönnermark et al. 2008). Nykyinen arvio laitosten ilmapäästöistä on näitäkin arvioita alempi eli noin 0,8 g/a PCDD/F-yhdisteitä vuodessa (Naturvårdsverket 2008). Sekajätteen kaatopaikkapalon kaltaisissa polttotesteissä savukaasujen PCDD/F-pitoisuudelle on saatu suuresti vaihtelevia tuloksia väliltä 51–427 pg (TEQ)/m<sup>3</sup> (Ruokojärvi et al. 1995b). Muovikalvolla paalattujen jätepaalien savusta on määritetty 14,09 ng (TEQ)/Nm<sup>3</sup> luokkaa olevia pitoisuuksia ja 3,04 µg/Nm<sup>3</sup> PAH-pitoisuuksia ilman naftaleenia ja naftaleenin pitoisuus samassa tutkimuksessa erikseen oli luokkaa 0,82 µg/Nm<sup>3</sup> (Nammari et al. 2004).

Jätepalojen tutkimuksissa on saatu ilmaan kokonais-PAH-päästöksi luokkaa 1 290–1 670 ng/m<sup>3</sup> ja kontrolloimattomassa kaatopaikkapalossa luokkaa 810 ng/m<sup>3</sup> olevia kokonais-PAH-päästöjä (Ruokojärvi et al. 1995a). Yleisesti esimerkiksi hiilenpoltossa muodostuva puhdistamaton savukaasu voi sisältää 1 000 µg/m<sup>3</sup> PAH-yhdisteitä ja tupakan savu 100 µg/m<sup>3</sup> (Manahan 2005).

PAH-yhdisteiden kertymistä jätepalon savun laskeuma-alueelle on tutkittu Kreikassa tapahtuneen suuren jätteen loppusijoituspaikan palon jälkeen. Tutkimuksessa todettiin päästöjen sekoittuvan mahdollisiin aiempiin päästöihin ja muihin taustapäästöihin ja että huomattavan suuria eroja palon savulaskeuman referenssialueeseen verrattuna juuri löytynyt, vaikka sääolosuhteet ja tuulen suunta olivat olleet suhteellisen vakioita palon tapahtuessa (Chrysikou et al. 2008). Jordaniassa on tutkittu maaperän PAH- ja PCDD/F-pitoisuuksia 25 vuotta sitten suljetun ja jatkuvasti avoimesti poltetun Markassa Am-

manissa sijaitsevan kaatopaikan ja edelleen toiminnassa olevan Ekeerissä Irbidissä sijaitsevan satunnaisesti jättepaloja kohdanneen kaatopaikan ympäristöissä. Tutkimuksessa löydettiin huomattavasti suurempia PCDD/F-, PAH- ja PCB-pitoisuuksia avoimesti palaneen ja edelleen 25 vuotta sulkemisensa jälkeen kyteneen kaatopaikan lähiympäristöstä, kuin vertailukohteena käytetystä toiminnassa olevan, satunnaisia paloja kohdanneen kaatopaikan ympäristöstä. (Wichmann et al. 2006). Kreetan saarella olevan avoimesti palavan talousjätteen kaatopaikan savukaasupäästöjen vaikutusta on myös tutkittu kaatopaikan lähiympäristöstä. Päästöt jakautuivat pääosin tällä meren rannalle perustetulla avoimesti palavalla kaatopaikalla vain ympäröivään lähiympäristöön, ja palon päästöjen aiheuttamaa kontaminaatiota oli vaikeampi osoittaa kauempana saarella olevista maaperästä tutkituista vertailupisteistä. PCDD/F-yhdisteitä löytyi lähes kolminkertaisesti enemmän palaneen kaatopaikan maaperänäytteestä, mutta ympäröivässä maassa oli vain yhtä kertaluokkaa referenssialuetta enemmän näitä yhdisteitä (Martens et al. 1998).

### 3.2.3 Sammutusjätevedet

Kaatopaikka- tai jätetalon sammutus tapahtuu tehokkaimmin käyttäen sammutukseen vettä ja kaivamalla palava tai kytevä jäte esiin sammutusta ja lämmön haihduttamista varten. Tukahduttaminen savella yms. maa-aineksella ei toimi yhtä tehokkaasti (Ettala et al. 1996).

Sammutusvedet läpäisevät sammutettavan jätekasan ja voivat huuhtoa mukaansa normaalia enemmän mm. raskasmetalleja ja orgaanista ainesta ja palossa muodostuvia haitallisia yhdisteitä (Lönnermark et al. 2008). Norjalaisessa jätteen loppusijoituspaikan paloa käsittelevässä tutkimuksessa, jossa tutkittiin noin 55 000 tonnin jätetalon norjalaisella yhdyskunta- ja rakennusjätteen loppusijoituspaikalla, saatiin tulokseksi, että sammutusveden käyttö palon sammutuksessa huuhtoo kaatopaikkapalossa raskasmetalleja suotoveden huomattavan paljon. Raskasmetallipitoisuudet kuparin, kromin ja lyijyn osalta nousivat 10-kertaiseksi 2002 vuoden tasoon verrattuna, kadmiumin osalta jopa 50-kertaiseksi ja suotoveden kemiallinen hapenkulutus nousi sekin maksimissaan 15-kertaiseksi aiemmasta normaalitasosta. Mitatut pitoisuudet olivat jätetalon jälkeen: Cu 390 µg/l, Cr 330 µg/l, Cd 5,2 µg/l, Pb 52 µg/l ja COD 3 800 mg/l. Myös elohopeapäästö nousi 13-kertaiseksi normaalista tasosta 0,13 µg/l pitoisuuteen. PAH-yhdisteiden määrän ei kuitenkaan huomattu nousevan suotovesissä palon aikana, joka saattoi johtua jätteen koostumuksesta. (Øygard et al. 2005). Syvältä loppusijoituspaikasta otettujen jätenäytteiden polttotesteissä sammutusvesiin kertyneet päästöt olivat huomattavasti matalampia kuin tutkimuksessa savukaasuista mitatut (Lönnermark et al. 2008).

### 3.3 Haitalliset yhdisteet

Jätepaloissa palon olosuhteet eivät ole optimaaliset, ja palaminen on muun muassa hapen määrästä johtuen usein erittäin epätäydellistä. Lisäksi yhdyskuntajäte sisältää monia erilaisia materiaaleja, kuten klooria sisältävää polyvinyylidikloridia, jonka palaessa muodostuu monia haitallisia yhdisteitä, kuten dioksiineja ja furaaneja. Lisäksi epätäydellisessä palamisessa muodostuu myös polyaromaattisia hiilivetyjä eli PAH-yhdisteitä.

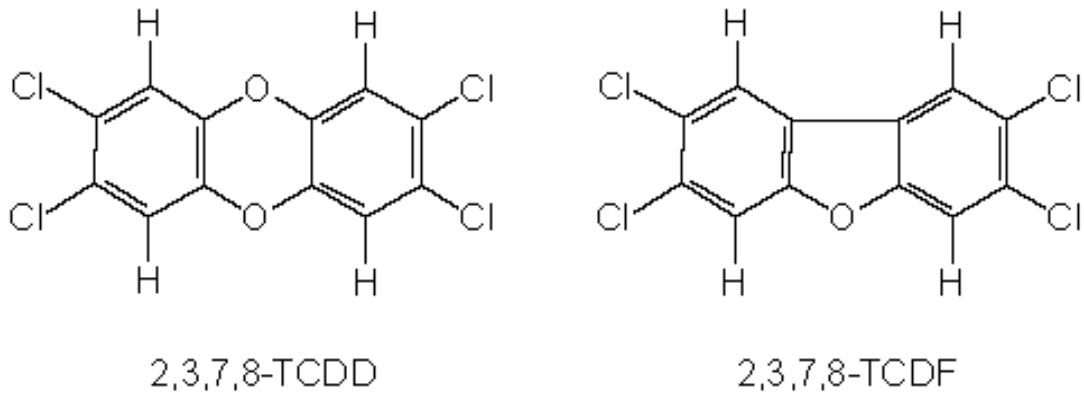
#### 3.3.1 Dioksiinit ja furaanit

Myrkyllisimpiä paloissa muodostuvia yhdisteitä ovat tasomaiset trisykliset yhdisteet, polyklooratut dibentso-p-dioksiinit ja dibentso furaanit (Polychlorinated dibenzo-p-dioxins PCDD ja polychlorinated dibenzofurans PCDF). Näitä yhdisteitä ei ole koskaan tarkoituksellisesti tuotettu, mutta niitä muodostuu sivutuotteina kemianteollisuudessa mm. kloorifenolien ja rikkaruohomyrkköjen tuotannossa ja metalli- ja paperiteollisuudessa ja polttoprosesseissa (UNEP 1999, IARC 1997). Suomen PCDD/F-yhdisteiden kokonaispäästöksi ympäristöön on arvioitu n. 100–200 g (TEQ)/a (UNEP 1999).

Termi ”dioksiinit” käsittää 75 polykloorattujen dibentso-p-dioksiinien kongeneeriä ja 135 polykloorattujen dibentsofuraanien kongeneeriä. Näistä 210:ssä kongeneeristä 17 sisältää klooriatomeita liittyneinä yhdisteiden rengasrakenteissa hiiliatomeihin 2,3,7 ja 8. Nämä 17 kappaletta 2,3,7,8-substituutiot sisältävää kongeneeria ovat toksisia eläimille, ovat erittäin pysyviä ja kertyvät rasvaliukoisina ympäristön hiiltä sisältäviin maaperän ja sedimenttien matriiseihin ja organismien rasvakudoksiin, kuten eläimiin ja ihmisiin. Dioksiinit aiheuttavat kloorattuihin yhdisteisiin liittyviä vaikutuksia, kuten suurentunutta riskiä ihon leesiolle, maksatoimintojen ja rasva-aineenvaihdunnan muutoksia, yleistä heikkoutta ja huomattavaa painon vähenemistä, muutoksia maksan entsyymien aktivaatiossa, immuunisysteemin vasteen laskemista, ja sisäeritysjärjestelmän ja hermostojärjestelmän epänormaalia toimintaa (UNEP 1999).

2,3,7,8-tetraklooridibentso-p-dioksiinin on todettu olevan karsinogeeninen ihmisille ja siksi se kuuluu korkeimpaan kategoriaan 1 syöpää aiheuttavien kemikaalien arvioinnissa (IARC 1997).

Kuvassa 4 on 2,3,7,8-tetraklooridibentso-p-dioksiinin ja 2,3,7,8-tetraklooridibentsofuraanin rakennekaavat, joista näkyy yhdisteiden hiilirenkaista koostunut rakenne ja klooriatomien liittymiskohdat.



Kuva 4. 2,3,7,8-tetraklooridibentso-p-dioksiinin ja 2,3,7,8-tetraklooridibentsofuraanin rakennekaavat (UNEP). (Lähde: <http://www.chem.unep.ch/pops/images/dioxin.gif>)

Polyklooratuille dibentso-p-dioksiineille ja dibentsofuraaneille on kehitetty toksisuus-ekvivalenttikertoimia. Tutkimuksissa toksisimmaksi dioksiiniyhdisteistä on todettu 2,3,7,8-tetraklooridibentso-p-dioksiini (TCDD). Tämän lisäksi eri dioksiinikongeneerille on kehitetty jokaiselle omat TEF-toksisuusekvivalenttikertoimet (Toxicity Equivalent Factor) Maailman terveysjärjestössä WHO:ssa. Toksisuusekvivalenttikertoimia käyttäen voidaan määrittää lopullisesti toksisuus-ekvivalentti TEQ usean eri dioksiinikongeneerin sisältävälle sekoitukselle. Toksisuusekvivalentti TEQ saadaan, kun jokaisen määritetyn yhdisteen määrä kerrotaan yhdisteelle annettulla toksisuus-ekvivalenttikertoimella ja näistä saaduista arvoista muodostetaan yhteenlaskemalla kaikkien yhdisteiden kokonais-2,3,7,8-TCDD-vastaavuus. Alkuperäiset WHO:n TEF-kertoimet vahvistettiin vuonna 1998 ja niitä tarkistettiin WHO:n uudelleenarvioinnissa vuonna 2005 (Van Den Berg et al. 2006). ITEF-99 merkintä tarkoittaa myös WHO:n kertoimia.

WHO:n määrittelemien toksisuus-ekvivalenttikertoimien lisäksi on olemassa myös Pohjoismaiden määrittämä Nordic-TEF-luokitus ja NATO-standardi (Nordic Atlantic Treaty Organisation). Taulukossa 5 on WHO:n määrittämät ja eri järjestöjen dioksiinikongeneereille vahvistetut toksisuus-ekvivalenttikertoimet.

Taulukko 5. Eri järjestöjen määrittelemät dioksiinien ja furaanien TEF-arvot (Bhavsar et al. 2008).

	<b>Nordic</b>	<b>NATO-I</b>	<b>WHO</b>	<b>WHO</b>
	1988	1989	1998	2005
<b>Klooratut dibentso-p-dioksiinit</b>				
2,3,7,8-TCDD	1	1	1	1
1,2,3,7,8-PeCDD	0.5	0.5	1	1
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1	0.1	0.1	0.1
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1	0.1	0.1	0.1
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1	0.1	0.1	0.1
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.01	0.01	0.01	0.01
1,2,3,4,6,7,8,9-OCDD	0.001	0.001	0.0001	0.0003
<b>Klooratut dibentsofuraanit</b>				
2,3,7,8-TCDF	0.1	0.1	0.1	0.1
1,2,3,7,8-PeCDF	0.01	0.05	0.05	0.03
2,3,4,7,8-PeCDF	0.5	0.5	0.5	0.3
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.1	0.1	0.1	0.1
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1	0.1	0.1	0.1
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1	0.1	0.1	0.1
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.1	0.1	0.1	0.1
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.01	0.01	0.01	0.01
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.01	0.01	0.01	0.01
1,2,3,4,6,7,8,9-OCDF	0.0010	0.0010	0.0001	0.0003

Orgaanisen materiaalin poltto kloorin läsnä ollessa, esim. polyvinyylidikloridin tai natriumkloridin, on todettu olevan suuri dioksiinien muodostumislähde. Polttoaineen kupari toimii kloorin tavoin dioksiinien muodostusta lisäävänä tekijänä. Toisaalta myös polttoaineen suuren rikkipitoisuuden on havaittu vähentävän dioksiinien muodostumista polttoprosessissa. Matemaattisesti eri kirjallisuusarvoja tarkastelleessa tutkimuksessa palavassa materiaalissa esiintyvän kloorin ja kuparin määrä korreloi suoraan verrannollisesti muodostuvien dioksiinien määrän kanssa (Thomas & McCreight 2008). Tämä on huomattu Suomessa myös pilottikokoluokan polttotesteissä, joissa saatiin vähennettyä PCDD/F-yhdisteiden muodostumista 50 kW:n polttimella varustetun koelaitteiston savukaasuista injektoimalla savukaasuihin SO<sub>2</sub>-kaasua (Ruokojärvi et al. 2004).

PCDD/F-yhdisteiden muodostumisessa on esitetty kolme eri muodostumisreaktiota, ensimmäinen niistä on pyrosynteesi eli muodostuminen korkeissa lämpötiloissa kaasufaasissa, toinen käsittää de novo -muodostumisen makromolekyylisestä hiilestä ja kloorista matalissa lämpötiloissa ja kolmas tyyppi on muodostuminen esiasteista eli prekursorista, kuten kloorifenoleista tai polyklooratuista difenyyliettereistä, joita voi muodostua epätäydellisen palamisen kaasufaasissa ja joiden yhdistyessä tuhkan kanssa muodostuu PCDD/F-yhdisteitä (Tuppurainen et al. 2003). PCDD/F-yhdisteiden opti-

maalisimman muodostumislämpötilan on todettu olevan suurella todennäköisyydellä välillä 350–400 °C (Shin et al. 1999). 1990-luvulla tehdyissä jätekasan polttotesteissä kasan lämpötilan todettiin nousevan yli 350 °C (Ettala et al. 1996). Tällöin jätetalossa on mahdollisesti sopivat olosuhteet PCDD/F-yhdisteiden muodostumiseen.

Dioksiinien kongeneereja muodostuu eri määriä erilaisissa polttoprosesseissa. Siksi on mahdollista tunnistaa mahdollisia vastaavuuksia päästölähteiden ja ympäristöstä otettujen hiukkas-, maa- ja sedimentinäytteiden välillä tutkimalla 2,3,7,8-substituution sisältävien ja näitä substituutioita sisältämättömien yhdisteiden esiintymisprofiileja (Ogura et al. 2001). Vastaavuuksia päästölähteiden, kuten jätteenpolttolaitosten ja ympäristönäytteiden, välillä on löydetty ja samansukuisten eri kongeneerien on todettu käyttäytyvät toistensa kaltaisesti ympäristössä (Ogura et al. 2001, Domingo et al. 2001). Termi profiili viittaa PCDD/F-yhdisteiden kohdalla eri kloorautumisasteiden väliseen jakautumiseen; esimerkiksi kaikki tetraCDF-yhdisteet verrattuna penta, heksa, hepta ja okta-CDF-yhdisteisiin siten, että profiilit eivät ole isomeerispesifisiä. Termi kuvio tarkoittaa PCDD/F-yhdisteiden tapauksessa suhteellista esiintymistä yhden isomeeriryhmän sisällä. Esimerkiksi kaikki 22 tetraCDD- tai kaikki 28 pentaCDF-yhdistettä muodostavat omat kuvionsa (Rappe 1994).

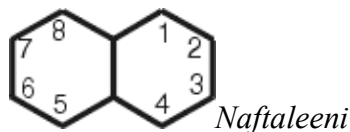
### 3.3.2 Polyaromaattiset hiilivedyt

Polysykliset aromaattiset hiilivedyt (PAH) ovat monimutkaisten orgaanisten yhdisteiden luokka. Niitä muodostuu hiilen, öljyn, kaasun, puun, jätteen tai muun orgaanisen aineen epätäydellisessä palamisessa. Polysyklisiä aromaattisia hiilivetyjä on yli 100 erilaista yhdistettä ja yleensä ne esiintyvät ainoastaan monimutkaisina seoksina mm. palamistuotteissa. PAH-yhdistettä muodostuu luonnollisesti mm. metsäpaloissa ja tulivuorenpurkauksissa ja niitä voidaan myös tuottaa yksittäin tutkimustarkoituksiin (ATDSR 1995). PAH-yhdisteisiin kuuluvat myös niiden johdannaiset, kuten nitro-PAH-yhdisteet, hapettuneet- ja heterosykliset yhdisteet (WHO 2000).

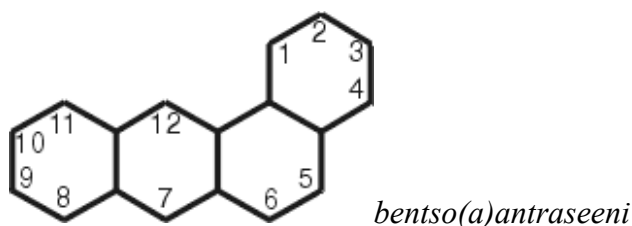
Polysykliset aromaattiset hiilivedyt koostuvat viisi ja kuusi hiiliatomia sisältävistä rengasmaisista rakenteista, joissa on vähintään kaksi bentseenirengasta yhteenliittyneinä. Tunnetuin näistä on bentso(a)pyreeni (B(a)P) (3,4-bensopyreeni tai bentso(d,e,f)kryseeni) eli C<sub>20</sub>H<sub>12</sub>, joka koostuu viidestä bentseenirenkaasta (Ravindra et al. 2008, ILO 2008). Bentso(a)pyreenin sulamispiste on korkea 178,1 °C ja kiehumispiste on huomattavan korkea 496 °C. Yhdisteen molekyylimassa on 252,3 (ILO). Puhtaina kemikaaleina PAH-yhdisteet ovat värittömiä valkoisia tai haalean kelta-vihreitä kiinteitä aineita, joilla on mieto miellyttävä tuoksu. Tunnetuimpien 17-yhdisteen kesken kiehumispisteet vaihtelevat suuresti välillä 96,2–550 °C. Osaa PAH-yhdisteistä käytetään lääkkeiden, väriainneiden, muovien ja torjunta-aineiden valmistamiseen (ATDSR 1995).



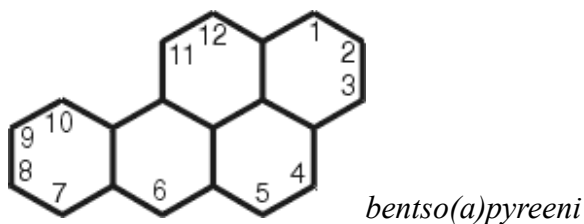
Kuvissa 5–7 on kuvattu bentso(a)antraseenin ja bentso(a)pyreenin rakennekaavat.



Kuva 5. Naftaleenin rakenne (NIST).



Kuva 6. Benso(a)antraseenin rakenne (NIST).



Kuva 7. Bentso(a)pyreenin rakenne (NIST).

Teollisuudessa asfalttituotannossa syntyy suuria määriä PAH-yhdisteitä ja niitä voidaan myös löytää raakaöljystä, hiilestä, kivihiilitervasta, kreosootista ja kattopiestä. PAH-yhdisteitä löytyy kaikkialta ympäristöstä – ilmasta, vedestä ja maaperästä – ja ne voivat esiintyä ilmassa hiukkasiin kiinnittyneinä tai kiinteinä maaperässä tai sedimenteissä. (ATDSR 1995). Yleisesti esimerkiksi Bentso(a)pyreeniä löytyy urbaanien alueiden ilmasta Euroopassa keskimäärin 1–10 ng/m<sup>3</sup>-pitoisuuksia ja maaseutualueella alle 1 ng/m<sup>3</sup> (WHO 2000).

Polttoprosessit, kuten liikenne, teollisuus ja energian tuotanto, ovat PAH-yhdisteiden suurimpia lähteitä ilmaan. PAH-yhdisteitä muodostuu pyrosynteesissä ja pyrolyysissä. Ne ovat kaksi päämekanismia, jotka voivat selittää polyaromaattisten hiilivetyjen syntymisen. Lyhyemmät hiilivedyt muodostavat näitä yhdisteitä pyrosynteesissä, joka tapahtuu noin 500 °C:n yläpuolella, jossa lämpötilassa hiili-vety- ja hiili-hiili-sidokset katkeavat ja muodostuu vapaita radikaaleja (Manahan 2005). Vaikka yhdisteiden muodostumista

ei vielä täysin ymmärretä, ollaan prosessin yleisistä ominaisuuksista yksimielisiä. PAH-yhdisteiden muodostumistapoja ovat: muodostuminen noen molekulaarisista prekursorista, kuten asetyleenistä, liekin seokseltaan rikkaassa ja vähähappisessa osassa. Nukleaatio tai syntyminen raskaista PAH-molekyyleistä, partikkelien massan kasvu kaasumaisten molekyyliden yhdistymisessä partikkelien pinnalle, hiukkas-hiukkas-törmäysten aiheuttaman koagulaation johdosta tapahtuva muodostuminen, hiukkasmaisen materiaalin hiiltyminen ja PAH- sekä nokihiukkasten hapettuminen (Richter & Howard, 2000). Nokeen adsorboitunut bentso(a) pyreeni on lyhytikäinen yhdiste kevyiden hapettuneiden yhdisteiden vaikutuksessa, koska molekyylillä on suuri reaktiopinta-ala. Bentso(a)pyreenin hapettumistuotteita ovat epksidit, kinonit, fenolit, aldehydit ja karboksyylihapot (Manahan, 2005).

Yhdysvaltojen ATSDR (The Agency for Toxic Substances and Disease Registry) on erikseen priorisoinut polyaromaattisista yhdisteistä 17 yhdistettä. Ne ovat asenafteni (Ace), asenaftyleeni (Acen), antraseeni (ANT), bents(a)antraseeni (BaA), bentso(a)pyreeni (BaP), bentso(e)pyreeni (BeP), bentso(b)fluoranteeni (B(f)F), bentso(g,h,i)peryleeni (B(ghi)P), bentso(j)fluoranteeni (B(j)F), bentso(k)fluoranteeni (B(k)F), kryseeni (KRY), dibents(a,h)-antraseeni B(a,h)A, fluoranteeni (FLU), fluoreeni (FLUO), indeno(1,2,3-c,d)pyreeni (IcdP), fenantreeni (FEN) ja pyreeni (PYR) (ATDSR 1995). Lukuun ottamatta bentso-[]fluoranteenia yhdisteet tunnetaan myös yhdysvaltain ympäristönsuojeluviraston (EPA, Environment Protection Agency) virallisesti priorisoimina PAH-yhdisteinä (Ravindra et al. 2008). YK:n Euroopan talouskomissio on määrittänyt PAH-yhdisteistä bentso(a)-pyreenin, bentso(b)fluoranteenin, bentso(k)fluoranteenin ja indeno(1,2,3-c,d)pyreenin kaukokulkeutuviksi POP-yhdisteiksi dioksiinien ohella (UNECE 1998).

Eläinkokeet osoittavat, että useat PAH-yhdisteet voivat aiheuttaa monia haitallisia vaikutuksia, kuten immuunitoksisuutta, genotoksisuutta, karsinogeenisyyttä ja lisääntymistoksisuutta ja voivat mahdollisesti aiheuttaa ateroskleroosia eli valtimon kovettumatautia. Bentso(a)pyreenin on laajasti todettu aiheuttavan kasvaimia eri kudoksissa riippuen testatusta lajista ja altistustavasta (WHO 2000, OEHHA 1994, USDHHS 2008). Ihmisten pääasiallinen altistuminen näille yhdisteille tapahtuu saastuneen ilman välityksellä, kuten savun, tupakansavun, pakokaasujen hengityksen kautta, saastuneen veden tai ruuan välityksellä. Ruuassa PAH-yhdisteitä on kuitenkin korkeintaan mikrogrammoja. Lisäksi mahdollinen ihokosketus PAH-yhdisteitä sisältävien aineiden, kuten asfaltin ja kivihiilitervan, kanssa voi aiheuttaa altistumista (USHHDS). Maailman terveysjärjestön (WHO) kansainvälinen syöväntutkimuslaitos (IARC) määritti vielä aiemmin Bentso(a)pyreenin ryhmään 2B ”mahdollisesti ihmiselle karsinogeeniset yhdisteet”, mutta nyt luokitusta ollaan nostamassa luokkaan 1 ”ihmiselle karsinogeeniset yhdisteet” (IARC 2008). Eri- laisten PAH-yhdisteitä sisältävien sekoitusten, kuten kivihiilitervan, kivihiilitervan tisleiden (kreosootti), mineraaliöljyjen, noen ja tupakansavun, on todettu olevan ihmiselle karsinogeenisiä (Collins et al. 1998).

Erikseen priorisoiduille PAH-yhdisteille on arvioitu tutkimuksissa erilaisia TEF-kertoimia, joissa niitä verrataan bentso(a)pyreenin vaarallisuuteen. Taulukossa 6 on ilmoitettu TEF-kertoimia eri PAH-yhdisteille.

*Taulukko 6. PAH-yhdisteille ehdotettuja TEF-kertoimia (Safe 1998).*

<b>Yhdiste</b>	<b>CAS-Numero</b>	<b>U.S EPA (1984)</b>	<b>Thorslund (1990)</b>	<b>Nisbet &amp; LaGoy (1992)</b>
dibentso[a,h]antraseeni	53-70-3	1	1.1	5
bentso[a]pyreeni	50-32-8	1	1	1
bentso[a]antraseeni	56-55-3	0.1	0.145	0.1
bentso[b]fluoranteeni	205-99-2	0.1	0.14	0.1
bentso[k]fluoranteeni	207-08-9	0.01	0.066	0.1
indeno[1,2,3-c,d]pyreeni	193-39-5	0.1	0.232	0.1
antraseeni	120-12-7	0	0.32	0.01
bentso[g,h,i]peryleeni	191-24-2	0	0.022	0.01
kryseeni	219-01-9	0.001	0.0044	0.01
asenafteeni	83-32-9	0		0.001
asenaftyleeni	208-96	0		0.001
fluoranteeni	206-44-0	0		0.001
fluoreeni	86-73-7	0		0.001
2-metyylinaftaleeni	91-57-6	0		0.001
naftaleeni	91-20-3	0		0.001
fenantreeni	8501-B	0		0.001
pyreeni	129-00-0	0	0.081	0.001

Tämän lisäksi OEHHA (The Office of Environmental Health Hazard Assessment) on määrittellyt erikseen potentiaalisia ekvivalenttikertoimia (Potential Equivalent Factor, PEF) näille yhdisteille. PEF-kertoimilla yritetään verrata muiden polyaromaattisten hiilivety-yhdisteiden syöpävaarallisuutta bentso(a)pyreeniin (Collins et al. 1998). Taulukossa 7 on OEHHA:n määrittelemiä potentiaalisia ekvivalenttikertoimia eri PAH-yhdisteille.

Taulukko 7. OEHHA:n kehittämiä PEF-kertoimia PAH-yhdisteille (OEHHA 1994).

Yhdiste	CAS-Numero	IARC Luokitus	PEF-kerroin
bentso[a]pyreeni	50-32-8	2A*	1,0
bentso[a]antraseeni	56-55-3	2A	0,1
bentso[b]fluoranteeni	205-99-2	2B	0,1
bentso[j]fluoranteeni	205-82-3	2B	0,1
bentso[k]fluoranteeni	207-08-9	2B	0,1
kryseeni	219-01-9	3	0,01
dibentso[a,j]akridiini	224-42-0	2B	0,1
dibentso[a,h]akridiini	226-36-8	2B	0,1
7-H-dibentso[c,g]karbatsoli	194-59-2	2B	1,0
dibentso[a,e]pyreeni	192-65-4	2B	1,0
dibentso[a,h]pyreeni	189-64-0	2B	10,0
dibentso[a,i]pyreeni	189-55-9	2B	10,0
dibentso[a,l]pyreeni	191-30-0	2B	10,0
1-6-dinitropyreeni	42397-64-8	2B	10,0
1-8-dinitropyreeni	42397-65-9	2B	1,0
indeno[1,2,3,c,d]pyreeni	193-39-5	2B	0,1
5-metyylikryseeni	3697-24-3	2B	1,0
6-nitrokryseeni	7496-02-8	2B	10,0
2-nitrofluoreeni	607-57-8	2B	0,01
1-nitropyreeni	5522-43-0	2B	0,1
4-nitropyreeni	57835-92-4	2B	0,1
dibentso[a,h]antraseeni	53-70-3	2A	0,4
7,12-dimetyylibentsantraseeni	57-97-6	-	21,8
3-metyylikolantreeni	56-49-5	-	1,9
5-nitroasenafteni	602-87-9	2B	0,01

Näistä kehitetyistä erillisistä PAH-yhdisteiden TEF-kertoimista ei kuitenkaan olla täysin yksimielisiä ja niiden tieteellisestä pätevyydestä ei kaikilta osin olla myöskään vakuutuneita (WHO 2000).

### 3.4 Päästökertoimet

Päästökerroin tarkoittaa tuotettujen ja muodostuneiden päästöjen määrää suhteessa prosessoituun raaka-aineen määrään tai kuluneen polttoaineen määrään missä tahansa saastuttavassa prosessissa (EEA 2008). Päästökertoimia on erilaisille palaville orgaanisille materiaaleille etsitty mm. Ruotsin valtion teknisen testaus ja tutkimuskeskuksessa (Blomqvist et al. 2007). Tutkimuskeskus on arvioinut PCDD/F-, PAH- ja VOC-yhdisteiden päästökertoimia koko Ruotsissa tapahtuneiden palojen osalta ja laajasti kirjallisuuden perusteella. Jätteen loppusijoituspaikan paloista arvioitiin vapautuvan PCDD/F-yhdisteitä 0,04–0,9 ng/g (TEQ) ja PAH-yhdisteitä 0,0012–0,026 mg/g.

Taulukossa 8 on Blomqvistin ja kumppaneiden (2007) keräämiä päästökertoimia.

*Taulukko 8. Erilaisten palavien materiaalien päästökertoimia PCDD/F-, PAH- ja haihtuville orgaanisille VOC-yhdisteille (volatile organic compounds). PUR eli polyuretaani, PE eli polyeteenimuovi, ABS eli akryliniitriilibutadieenistyreeni (Blomqvist et al. 2007).*

<b>Materiaali</b>	<b>PCDD/F (ng TEQ/g)</b>	<b>PAH (mg/g)</b>	<b>VOC (mg/g)</b>
PVC	0,012–2,2	1–5	10–50
Puu	0,002	0,1–1,0	1–20
Puukuitulevy	0,02	0,1–1,0	1–20
Tekstiili	0,002	0,1	1
Paperi	0,002	0,1	1
Polystyreeni	0,002–0,1	10	5–30
PUR	0,002–0,1	1–10	1–50
PE	0,002–0,1	1	5–30
ABS	0,002–0,1	10	5–30
Raakaöljytuotteet	0,002–0,1	1	7,5
Kattohuopa (piki)	0,002–0,1	1	7,5
Linoleumi	0,002–0,1	1	7,5
Kumi	0,002–0,1	10	50
Orgaaniset liuottimet	0,002–0,1	1	7,5
Vilja	0,002	0,1	1

Australiassa tehdyssä tutkimuksessa verrattiin puuhakkeiden, MDF- ja lastulevyjen palamisen päästöjä. PAH-yhdisteiden osalta radiatamäntylle (*Pinus radiata* D. Don) saatiin kokonaispäästökseksi 20 800 µg/kg, MDF-levylle 58 900 µg/kg ja lastulevylle 68 900 µg/kg. Pääasiassa päästöt koostuivat kevyestä naftaleenistä. Bentso(a)antraseeniä muodostui männystä 82 µg/kg, MDF-levystä 484 µg/kg ja lastulevystä 614 µg/kg. Bentso(a)pyreeniä ei tutkimuksessa löytynyt näistä poltetuista puumateriaaleista. PCB:tä löytyi vain käsitellystä puusta, josta sitä vapautui MDF-levystä 40 µg/kg ja lastulevystä 48 µg/kg. Käytetyn mäntylajin hakkeen päästöistä ei juurikaan löydetty dioksiineja, mutta MDF-levylle päästökseksi muodostui 15,4 ng/kg (TEQ) ja lastulevylle 20,5 ng/kg (TEQ). Pääasiassa muodostui oktaklooridibentsodioksiinia (OCDD) ja 2,3,7,8-tetra-klooridibentsofuraania, joita oli MDF-levyn savukaasuissa 14 pg/l OCDD, 263 pg/l 2,3,7,8-TCDF ja lastulevyn savukaasuissa 40 pg/l OCDD ja 225 pg/l 2,3,7,8-TCDF. Huomattavaa on, että tutkituissa puunäytteissä ei ollut juurikaan klooria, kuten ei MDF-levyissä 0,21 % tai lastulevyissä 0,18 %. MDF:ssä on lisäaineina fenoleja (fenoli, kreosoli ja formaldehydi) tai aminoyhdisteitä, kuten ureaa tai melamiinia. Lastulevy sisältää pääasiassa fenolia ja ureahartseja liima-aineina (Bhargava et al. 2002).

Syvältä kaatopaikasta otettujen kotitalousjätenäytteiden polttotestissä saatiin PCDD/F-yhdisteille päästökseksi maksimissaan 0,44 µg/kg (TEQ) luokkaa olevia arvoja. PCB:n

osalta tulokset olivat suurimmillaan 0,060 µg/kg (TEQ), Vetyklooribentseeniä (HBC) vapautui alle 96 µg/kg ja naftaleenin sisältäviä PAH-yhdisteitä 0,52 g/kg. Tulokset vaihtelivat kuitenkin huomattavasti eri polttojen välillä ja jopa rinnakkaisten polttotestien kesken tutkimuksessa johtuen mahdollisesti eri näytteiden suuresta kosteusvaihtelusta. (Lönnermark et al. 2008). Belgiassa Flaamilaisessa teknologian tutkimuskeskuksessa on tutkittu hyvin yleistä jätteiden tynnyrissä polttamista ja siitä aiheutuvia dioksiinipäästöjä ilmaan. Märkiä lehtiä ja puuta sisältävälle puutarhajätteelle oli saatu polttotesteissä 4,5 ng/kg (TEQ) päästökerroin ja kotitalousjätteelle 35 ng/kg (TEQ) kerroin dioksiinipäästöille. Saadut tulokset ylittivät näin ollen jopa 35-kertaisesti Euroopan unionin jätteenpolttolaitoksille määrittelemät dioksiinipäästöjen raja-arvot (Wevers et al. 2004). USA:ssa tehtyjen kokeiden perusteella kotitalousjätteen tynnyripoltossa vapautuu mm. bentso(a)antraseeniä 1,51 mg/kg ja bentso(a)pyreeniä 1,4 mg/kg. Heksaklooribentseenille arvioitu päästökerroin oli 0,04 mg/kg. PCDD/F-yhdisteille arvioidut päästökerroimet olivat  $5,8 \cdot 10^{-3}$  mg/kg kokonaismassana ja  $7,68 \cdot 10^{-5}$  mg/kg (TEQ). PCB-yhdisteille päästökerroin oli arvioitu olevan luokkaa  $1,26 \cdot 10^{-1}$  mg/kg kokonaismassana ja  $1,34 \cdot 10^{-6}$  mg/kg TEQ-kertoimilla määritettynä (Lemieux et al. 2004).

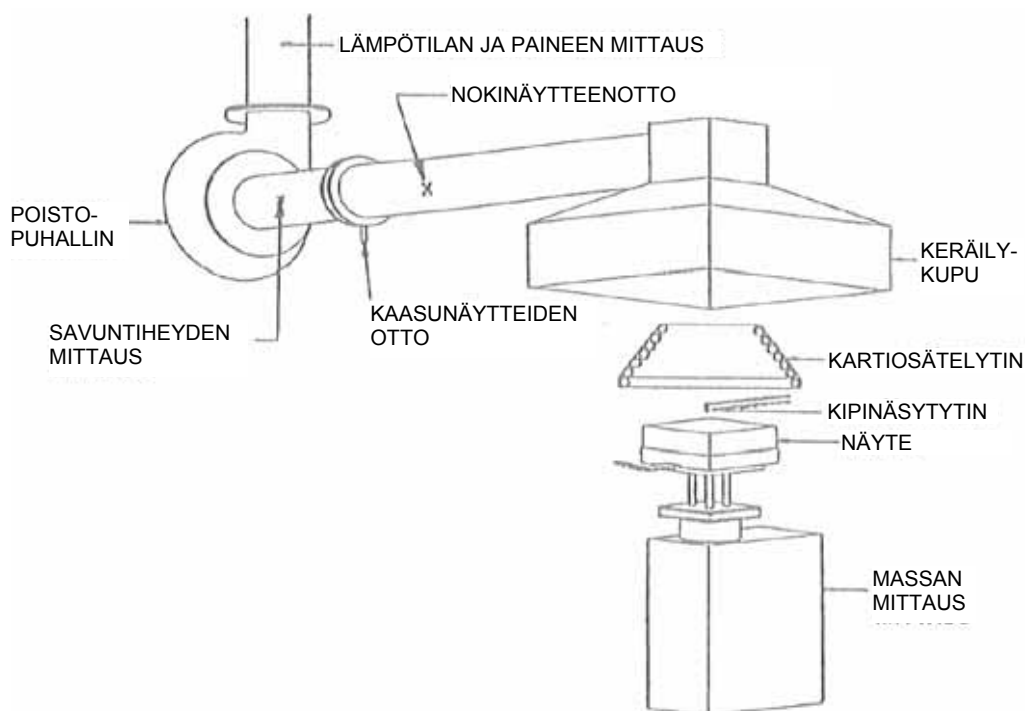
## 4. Kokeet

### 4.1 Pienen mittakaavan kokeet

#### 4.1.1 Koelaitteisto

Jätteiden palamisen aiheuttamia päästöjä tutkittiin pienen mittakaavan kokeissa kartiokalorimetrin avulla (kuvat 8 ja 9). Kartiokalorimetrissa näyte sytytetään palamaan sähkövastuksen synnyttämän lämpösäteilyn avulla. Kartiokalorimetrissa käytetty näyteko on 100 mm × 100 mm. Näytteen paksuus voi olla maksimissaan 50 mm. Kartiokalorimetrin kokoonpanoon kuuluu vaaka, jolle näyte asetetaan ja palamistuotteiden keräilyjärjestelmä, johon on sijoitettu kaasunäytteenotto sekä poistokaasujen lämpötilan ja virtausnopeuden mittaukset (Mikkola 1990). Näytteen palokäyttäytymistä tutkitaan monien tulossuureiden avulla, joita ovat mm. lämmönvapautumisnopeus ( $\text{kW/m}^2$ ), kokonaislämpömäärä ( $\text{MJ/m}^2$ ), massan muutosnopeus ( $\text{g/s}$ ), tehollinen lämpöarvo ( $\text{MJ/kg}$ ) ja savuntuottoarvo. Tulokset voidaan monessa tapauksessa suhteuttaa palavaan pinta-alaan, mikä on tärkeä tieto paloteknisessä mielessä.

Päästönäytteenotto tehtiin savukaasujen poistoputken mittausyhteestä (kuva 10).



Kuva 8. Kartiokalorimetrin rakennekaavio (Mikkola 1990).



*Kuva 9. SER-murskaa kartiokalorimetrikokeessa.*

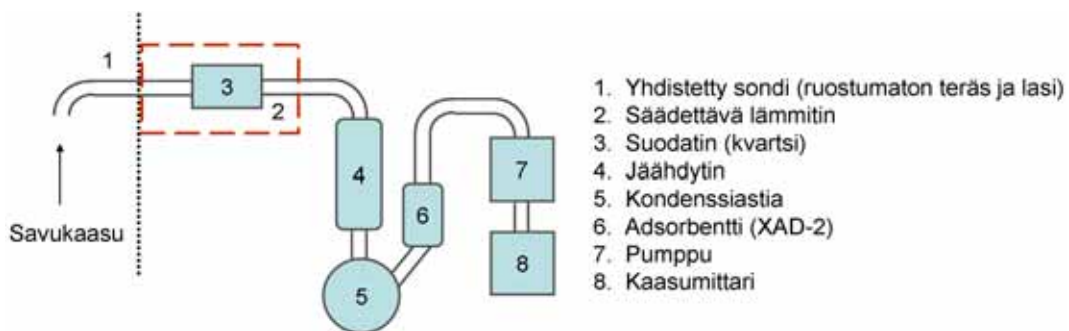


*Kuva 10. Päästönäytteenotto tehtiin savukaasujen poistoputken mittausyhteestä (merkitty nuolella).*



#### 4.1.2 Päästömittaustekniikka

Kartiokalorimetrikokeissa savukaasunäytteenotto perustui SFS-EN 1948-1 ja ISO 11338-1:2003 standardeihin. Periaatekuva näytteenotosta on esitetty kuvassa 11. Savukaasunäytteet kerättiin kartiokalorimetrin poistokanavasta käyttäen avuksi siihen asennettua ruostumattomasta teräksestä valmistettua reikäputkea. Reikäputki oli yhdistetty näytteenotossa käytettyyn lasisondiin. Kanavan ulkopuolinen näytteenottolinja ja suodatin oli lämmitetty noin 180 °C:seen. Tällä haluttiin estää näytteen mahdollinen kondensaatio ja hiukkashäviöt kylmään näytelinjaan. Suodattimen jälkeen näytekaasu lauhdutettiin noin 23 °C:seen ja kaasufaasissa esiintyvät yhdisteet kerättiin XAD-2 (Amberlite XAD-2, Supelco) -adsorbenttiin. Näytteenotossa käytetyt kvartsiset kuppisuodattimet (ET/MK360, Munktell) ja XAD-2-adsorbentti olivat esipuhdistettuja. Näytteenottoaika kokeessa oli yhteensä 15 minuuttia (3 × 5 minuuttia) ja näytekaasun määrä 150–170 l. Suodatin- ja XAD-2-näytteiden uutto ja analysointi tehtiin pääasiassa Kuopion yliopistolla ympäristötieteiden laitoksella. Ainoastaan dioksiini ja furaani yhdisteiden analyysit tehtiin Kansanterveyslaitoksella Kuopion yksikössä.



Kuva 11. Kaaviokuva kalorimetrikokeiden päästönäytteenotosta.

Kerätyistä savukaasunäytteistä analysoidut polyaromaattiset hiilivedyt (PAH), klooribentseenit, kloorifenolit, polyklooratut bifenyylit (PCB), dioksiinit (PCDD) ja furaanit (PCDF) on esitetty liitteen D taulukoissa D1–D5.

#### 4.1.3 Koemateriaalit

Kokeissa poltettiin kuutta eri jätemateriaalia:

- 1) PET-murska (PET)
- 2) Keräyspaperi (PAP)
- 3) Energiajäte (ENE)
- 4) Rengasmurska (REN)
- 5) Yhdyskuntajäte (YHD)
- 6) SER-murska (SER).



PET-murska



Keräyspaperi



Energiajäte



Rengasmurska



Yhdyskuntajäte



SER-murska

*Kuva 12. Koemateriaalit ennen koetta.*

#### **4.1.4 Kokeiden kulku**

Kartiokalorimetrikokeissa näytteenpitimeen mahtuva näytemäärä on rajallinen. Tavoitteena oli saada kullekin näytteelle riittävän pitkä paloaika, jotta päästömittausten vaatima näytetilavuus olisi riittävä. Tämä ratkaistiin valmistamalla kustakin jättemateriaalista 3 rinnakkaista näytettä, jotka poltettiin sarjassa peräkkäin. Näyte asetettiin näytteenpitimessä kartiosäteilyttimen alle, jonka säteilytaso kokeissa oli  $50 \text{ kW/m}^2$ . Näytteen syttymishetkellä käynnistettiin päästöjen keräys, jota jatkettiin 5 min. Sen jälkeen koe keskeytettiin. Tämä toistettiin yhteensä kolme kertaa, jolloin päästöjä kerättiin yhteensä 15 min kustakin jättemateriaalista. Näytteiden asento koelaitteistossa oli vaakasuora. Kuvasta 13 näkyy näytteen asettelu kartiokalometrilaitteistossa.



Kuva 13. Energiajätettä kartiokalorimetrikokeessa.

Eri materiaalien massat määritettiin esikokeilla siten, että kussakin näytteessä oli riittävästi palavaa materiaalia 5 min palamisjaksoon. Materiaalien massat ja syttymisaajat eri kokeissa on esitetty taulukossa 9. Kuvasarjassa 14 on esitetty eri koemateriaalit ennen koetta, kokeen aikana sekä kokeen jälkeen.

Taulukko 9. Näytteiden massat ja syttymisaajat.

Näytetunniste	Massa	Syttymisaika	Näytetunniste	Massa	Syttymisaika
<b>PET-murska</b>			<b>Rengasmurska</b>		
PET1	64.63 g	34 s	REN1	65.02 g	9 s
PET2	65.72 g	35 s	REN2	64.62 g	8 s
PET3	64.91 g	39 s	REN3	65.05 g	8 s
<b>Keräyspaperi</b>			<b>Yhdyskuntajäte</b>		
PAP1	47.68 g	4 s	YHD1	38.15 g	8 s
PAP2	48.55 g	4 s	YHD2	40.45 g	6 s
PAP3	47.60 g	3 s	YHD3	39.26 g	5 s
<b>Energiajäte</b>			<b>SER-murska</b>		
ENE1	47.88 g	7 s	SER1	63.17 g	5 s
ENE2	46.79 g	7 s	SER2	62.33 g	36 s
ENE3	47.37 g	4 s	SER3	63.96 g	21 s

### PET-murska



Ennen koetta



Kokeen aikana



Kokeen jälkeen

### Keräyspaperi



Ennen koetta



Kokeen aikana



Kokeen jälkeen

### Energiajäte



Ennen koetta



Kokeen aikana



Kokeen jälkeen



### Rengasmurska



Ennen koetta



Kokeen aikana



Kokeen jälkeen

### Yhdyskuntajäte



Ennen koetta



Kokeen aikana



Kokeen jälkeen

### SER-murska



Ennen koetta



Kokeen aikana



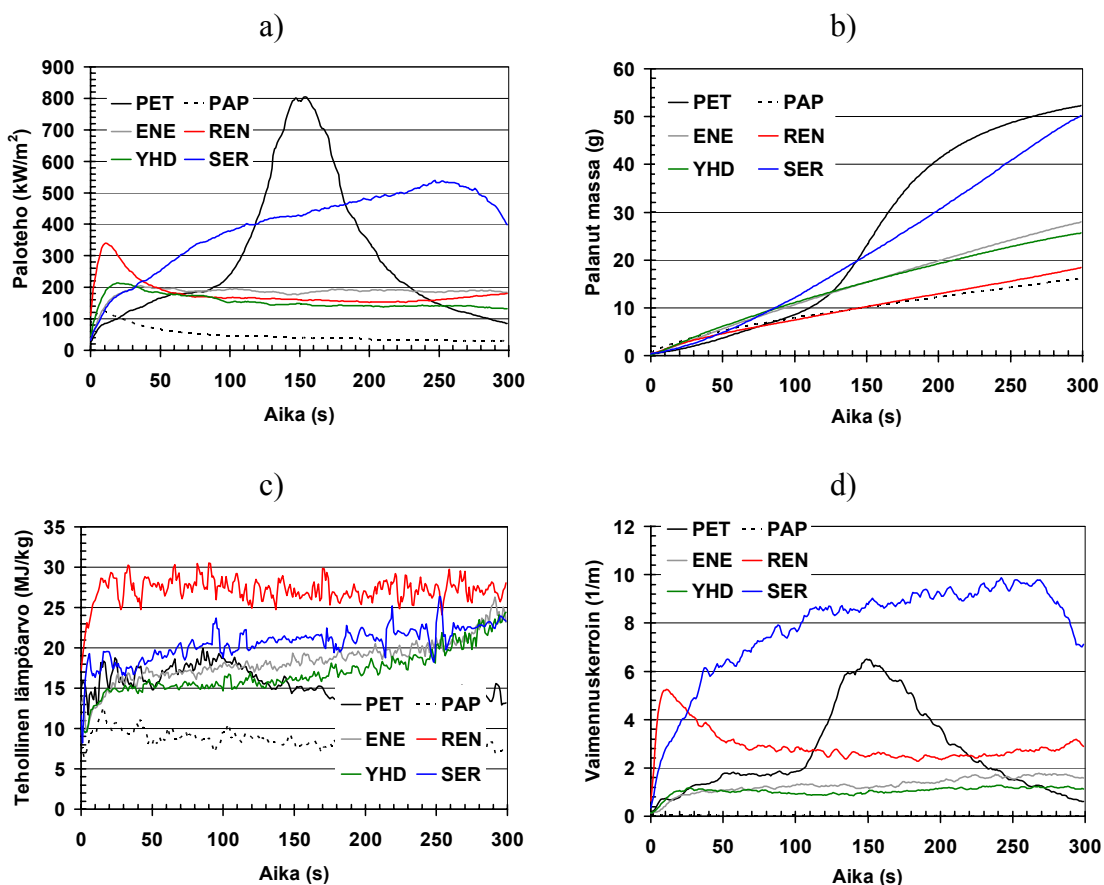
Kokeen jälkeen

*Kuva 14. Koemateriaalit ennen koetta, kokeen aikana sekä kokeen jälkeen.*

## 4.1.5 Tulokset

### 4.1.5.1 Palotekniset mittaukset

Kuvassa 15 esitetään kartiokalorimetrikokeiden tulokset eri jättejakeille (kolmen kokeen keskiarvo). Tuloskuviissa esitetään paloteho ( $\text{kW/m}^2$ ), palanut massa (g), tehollinen lämpöarvo ( $\text{MJ/kg}$ ) sekä vaimennuskerroin<sup>1</sup> ( $1/\text{m}$ ). Tulokset esitetään kokeen alusta (hetki, kun näyte altistetaan lämpösäteilylle) siihen ajanhetkeen, kun näytteen syttymisestä on kulunut 5 min. Yksittäisten kokeiden tulokset esitetään liitteessä B.



Kuva 15. Kartiokalorimetrikokeiden paloteknisten mittausten tulokset a) paloteholle, b) palaneen massan määrälle, c) teholliselle lämpöarvolle ja d) vaimennuskertoimelle.

<sup>1</sup> Vaimennuskerroin voidaan esittää kirjallisuuden perusteella ainakin kolmella eri tavalla. Tässä tapauksessa

vaimennuskerroin  $k$  määritetään seuraavasta yhtälöstä  $k = \frac{1}{d} \cdot \ln\left(\frac{I_0}{I_s}\right)$ , missä  $d$  (m) on valon säteen kulukema matka ja  $I_0$  on vaimentumattoman ja  $I_s$  vaimentuneen valon säteen intensiteetit.

Kuvan 15 tuloksista havaitaan, että kuten oletettua, muovipohjaisten jätäjakeiden (PET, SER) paloteho oli suurin. PET-murskalla palaminen on hyvin voimakasta kokeen puolella välissä. PET- ja SER-murskalla on myös palaneen massan määrä noin kaksinkertainen verrattuna muihin näytteisiin. Rengasmurskan tehollinen lämpöarvo vaihtelee välillä 25–30 MJ/kg ja on suurin mitatuista jätäjakeista. Savuntuottoa epäsuorasti kuvaavan vaimennuskertoimen arvo on SER-murskalla suurimmillaan, n. 10 m<sup>-1</sup>, kun se on puulla suurimmillaan n. 0,11 m<sup>-1</sup>.

Päästökertoimien määrittämiseksi kartiokalorimetrikokeiden tuloksista on laskettu kustakin kokeesta palaneen massan määrä 5 min ajanjaksolta näytteen syttymisestä (päästömittaustinja oli päällä vastaavan ajan). Kunkin yksittäisen kokeen ja kolmen kokeen yhteenlaskettu palaneen massan määrä esitetään taulukossa 10.

*Taulukko 10. Palaneen massan määrä päästömittausten ajalta.*

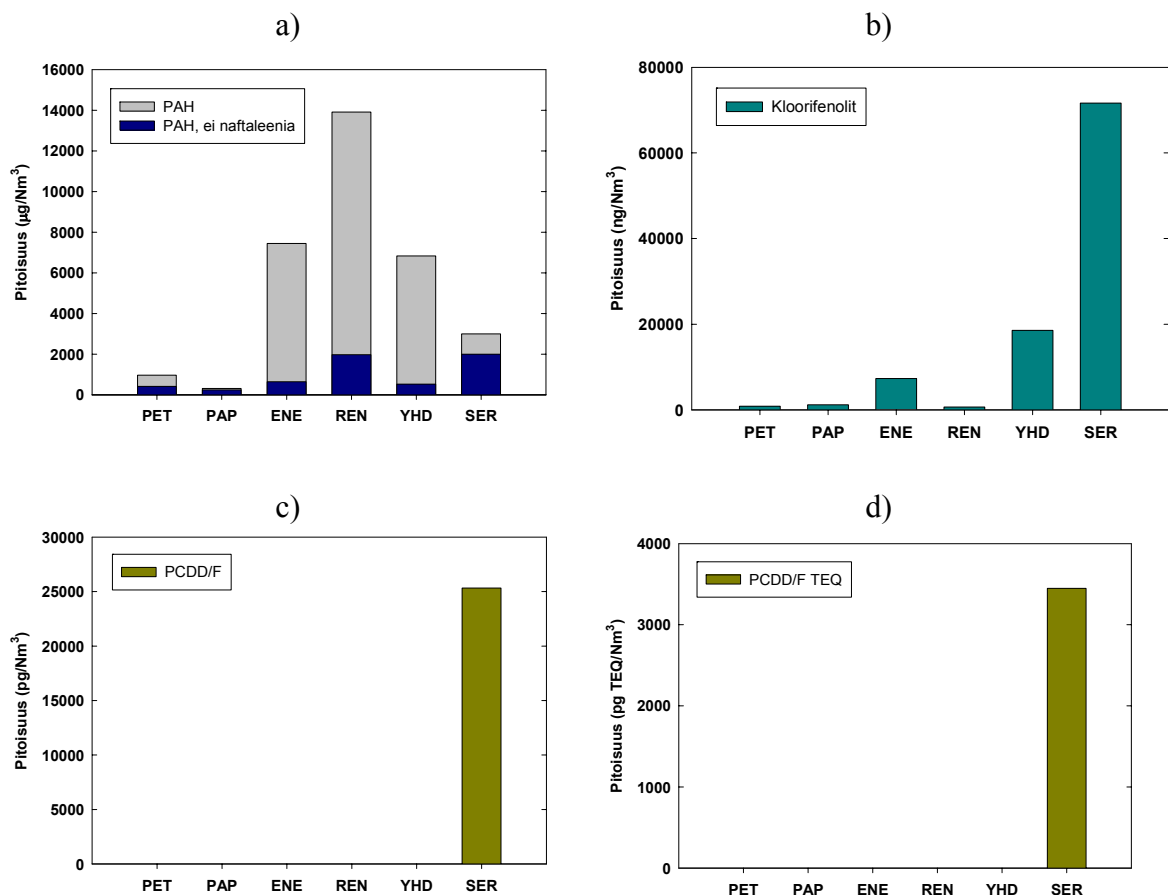
PET-murska		Paperisilppu		Energiajake	
koe	massa (g)	koe	massa (g)	koe	massa (g)
PET 1	44,62	PAP 1	16,03	ENE 1	26,58
PET 2	48,07	PAP 2	14,72	ENE 2	25,60
PET 3	48,15	PAP 3	15,21	ENE 3	27,16
yht.	140,84	yht.	45,96	yht.	79,35
Rengasmurska		Yhdyskuntajäte		SER-murska	
koe	massa (g)	koe	massa (g)	koe	massa (g)
REN 1	17,74	YHD 1	23,90	SER 1	48,21
REN 2	15,66	YHD 2	25,61	SER 2	40,34
REN 3	17,24	YHD 3	25,57	SER 3	45,55
yht.	50,65	yht.	75,08	yht.	134,09

#### 4.1.5.2 Savukaasupäästöt

Kalorimetrikokeiden savukaasunäytteistä analysoitujen PAH-, kloorifenoli-, dioksiini- ja furaaniyhdisteiden kokonaispitoisuudet on esitetty kuvissa 16a)–c). Tutkituista näytteistä ei löydetty klooribentseeni- eikä PCB-yhdisteitä.

PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuudet eri polttomateriaalien savukaasunäytteissä vaihtelivat 311–13 914 µg/Nm<sup>3</sup>:n välillä (kuva 16a)). Keräyspaperin (PAP) polttokokeessa PAH-pitoisuudet olivat selvästi alhaisemmat kuin muilla jättemateriaaleilla. Polttokokeen savukaasunäytteessä esiintyi vain kevyitä PAH-yhdisteitä (C10–C14) ja nekin kaasufaasissa. Selkeästi suurimmat PAH-päästöt saatiin energiajakeen (ENE), rengasmurskan (REN) ja yhdyskuntajätteen (YHD) polttokokeissa. Näissäkin päästöjen suurimmasta

osasta vastasivat kevyet PAH-yhdisteet. PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuudesta yli 95 % koostui kaasufaasista kaikkien muiden jättemateriaalien polttokokeissa paitsi SER-murskan (SER). SER-murskalla kaasufaasin osuus kokonaispitoisuudesta oli 68 %. Hiukkasiin sitoutuneiden raskaampien PAH-yhdisteiden (C16–C22) määrät olivat SER-murskan polttokokeissa kaikkein suurimmat, pitoisuudet olivat keskimäärin 20–40-kertaa suuremmat kuin PET-murskan (PET), energiajakeen ja yhdyskuntajätteen sekä 5 kertaa suuremmat kuin rengasmurskan polttokokeeseen verrattuna. Yksittäisistä PAH-yhdisteistä bentso(a)pyreenin pitoisuudet vaihtelivat 2–84  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ :n välillä ja olivat SER-murskan polttokokeessa selkeästi kaikkein suurimmat.



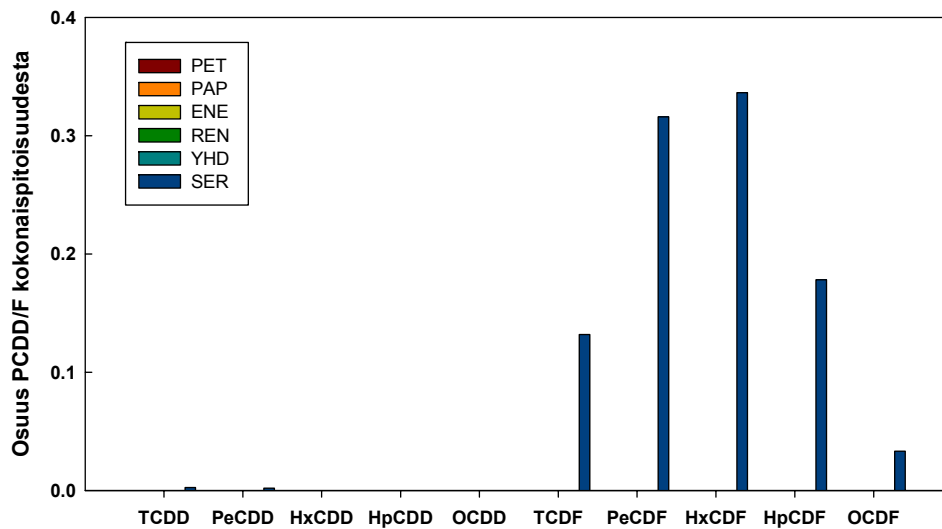
Kuva 16. a) PAH-yhdisteiden pitoisuus kartiokalorimetrikokeissa, b) kloorifenolien pitoisuus kartiokalorimetrikokeissa, c) PCDD/F-pitoisuus kartiokalorimetrikokeissa ja d) PCDD/F-pitoisuus toksisuusekvivalenteina.

Kloorifenolien kokonaispitoisuudet savukaasunäytteissä vaihtelivat 0,8–71,7  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ :n välillä (kuva 16b). Päästöt koostuivat lähinnä mono- ja dikloorifenoleista (yli 90 % päästöistä). Lisäksi päästöt koostuivat lähes yksinomaan vain kaasufaasista. PET-, PAP- ja REN-materiaaleilla kloorifenolipäästöt olivat selvästi (pitoisuudet 1  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ) alhaisemmat kuin muilla koemateriaaleilla.



Tutkituista savukaasunäytteistä ainoastaan SER-murskan polttokokeesta löytyi PCDD/F-yhdisteitä (kuva 16c). Savukaasun yhteenlaskettu PCDD/F-pitoisuus oli 25 ng/Nm<sup>3</sup>. Näytteessä PCDD/F-yhdisteet olivat jakaantuneet sekä kaasu- että hiukkasfaasiin. Kuvassa 16d on esitetty PCDD/F-kokonaispitoisuus toksisuusekvivalenteina (TEQ). Pohjoismaisen Nordic-luokituksen mukaan laskettu toksisuusekvivalenttipitoisuus SER-kokeessa oli 3,4 ng TEQ/Nm<sup>3</sup>.

SER-kokeessa PCDD/F-pitoisuus koostuu melkein yksin omaan furaaneista, dioksiinien osuus kokonaispitoisuudesta on vain puoli prosenttia (kuva 17).



Kuva 17. PCDD/F-isomeerien osuudet kartiokalorimetrikokeissa.

#### 4.1.6 Päästökertoimien määrittäminen pienen mittakaavan kokeiden perusteella

Päästöt  $Y$  esitetään usein suhteutettuna näytteenoton normitettuun kaasutilavuuteen  $n_s$  normikuutioon  $V_n$  (yksiköstä käytetään merkintää Nm<sup>3</sup>), jolloin:

$$Y = \frac{m_e}{V_n}, \quad (1)$$

missä  $m_e$  [g] on palosta syntyneiden päästöjen massa ja

$$V_n = V_{meas} \cdot \frac{273.15 \text{ K}}{T_{meas}} \cdot \frac{p_{meas}}{101.3 \text{ kPa}}, \quad (2)$$

jossa  $V_{meas}$  on näytteenotossa kerätty kaasutilavuus ja vastaavasti  $T_{meas}$  lämpötila ja  $p_{meas}$  paine.

Massayksikköä kohden ilmoitetun päästökertoimen  $Y_m$  [g/kg] laskemiseksi tarvitaan palossa syntyneiden yhdisteiden massan ( $m_e$ ) lisäksi tieto palaneen materiaalin  $m_b$  [kg] määrästä sekä tässä tapauksessa tiedot kokeessa käytettyjen linjastojen tilavuusvirroista yhtälön (3) mukaisesti:

$$Y_m = \frac{\dot{V}_c + \dot{V}_s}{\dot{V}_s} \cdot \frac{m_e}{m_b}, \quad (3)$$

missä  $\dot{V}_c$  [m<sup>3</sup>/s] ja  $\dot{V}_s$  [m<sup>3</sup>/s] ovat kartiokalorimetralaitteiston ja päästömittauslinjaston polttokokeiden aikaiset keskimääräiset tilavuusvirrat.

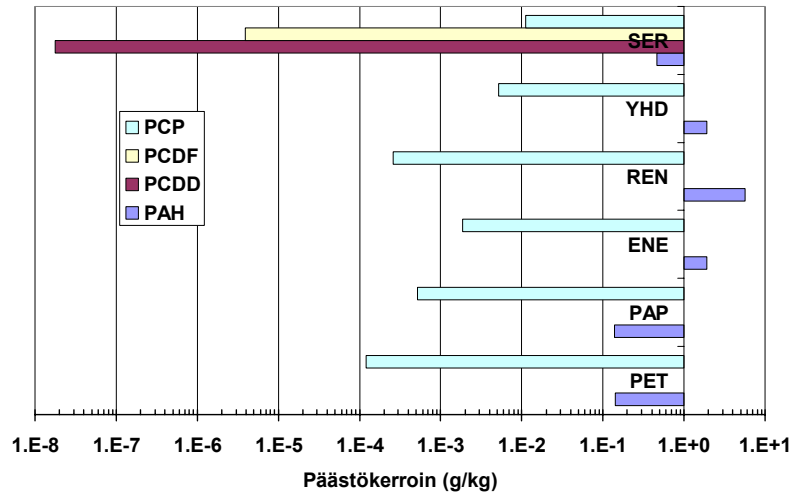
Taulukossa 11 esitetään yhtälöiden (1)–(3) avulla lasketut päästökertoimet  $Y_m$  ja normikuutiota kohden lasketut päästöjen pitoisuudet  $Y$  kullekin pienen mittakaavan kokeissa käytetylle materiaalille. Taulukon 11 arvot on esitetty graafisesti kuvassa 18.

*Taulukko 11. Pienen mittakaavan kokeiden perusteella normikuutiota kohden lasketut pitoisuudet  $Y$  ja päästökertoimet  $Y_m$ .*

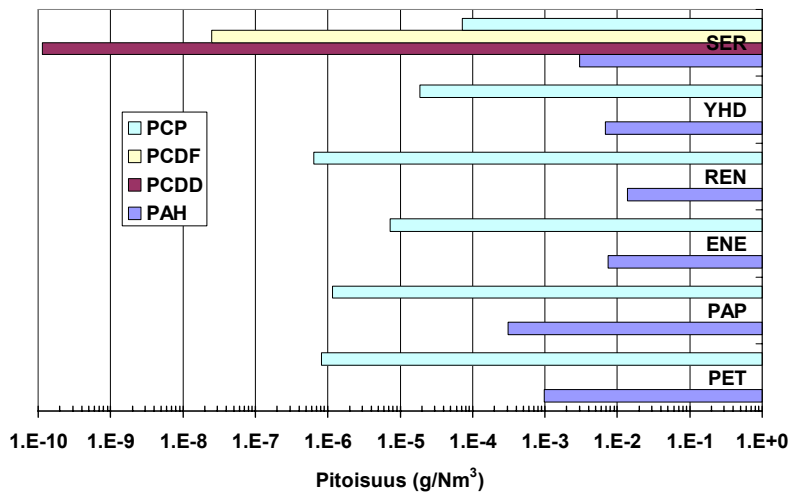
	PET-murska		Paperisilppu		Energiajäte	
Yhdiste	$Y$ (g/Nm <sup>3</sup> ) <sup>a</sup>	$Y_m$ (g/kg) <sup>a</sup>	$Y$ (g/Nm <sup>3</sup> )	$Y_m$ (g/kg)	$Y$ (g/Nm <sup>3</sup> )	$Y_m$ (g/kg)
PAH	9,69E-04	1,41E-01	3,11E-04	1,39E-01	7,45E-03	1,92E+00
PCDD	-	-	-	-	-	-
PCDF	-	-	-	-	-	-
kloorifenolit	8,22E-07	1,20E-04	1,16E-06	5,18E-04	7,31E-06	1,88E-03
	Rengasmurska		Yhdyskuntajäte		SER-murska	
Yhdiste	$Y$ (g/Nm <sup>3</sup> )	$Y_m$ (g/kg)	$Y$ (g/Nm <sup>3</sup> )	$Y_m$ (g/kg)	$Y$ (g/Nm <sup>3</sup> )	$Y_m$ (g/kg)
PAH	1,39E-02	5,65E+00	6,83E-03	1,90E+00	3,00E-03	4,64E-01
PCDD	-	-	-	-	1,14E-10	1,76E-08
PCDF	-	-	-	-	2,52E-08	3,90E-06
kloorifenolit	6,43E-07	2,61E-04	1,86E-05	5,17E-03	7,17E-05	1,11E-02

<sup>a</sup> päästökertoimiin ja pitoisuuksiin on laskettu yhteen sekä hiukkas- että kaasufaasissa esiintyvät yhdisteet.

a)



b)



Kuva 18. Pienen mittakaavan kokeiden perusteella lasketut a) päästökertoimet (yhdistetty hiukkas- ja kaasufaasi) ja b) pitoisuudet normikuutiota kohden. Vaaka-akseli logaritmisella asteikolla.

## 4.2 Suuren mittakaavan kokeet

### 4.2.1 Yleistä

Suuren mittakaavan kokeet järjestettiin Pelastusopiston harjoitusalueen alkusammutuskentällä. Alkusammutuslaatta on kooltaan  $20 \times 20$  m ja päällystetty 80 mm paksuilla betonisilla sidekivillä. Laatan alapuolinen maaperä on suojattu rakenteella, jossa sidekivien alla on 250 mm:n teräsbetoni-laatta, 0,2 mm:n kaksinkertainen muovikalvo sekä eristys. Laatussa on 1:50 kallistus reunoilta keskellä sijaitsevaan viemärikaivoon.

Viemärikaivo suojattiin kokeiden aikana karkealla teräksisellä siivilällä ja sen päälle asennettiin suodatinkangas hienomman jäteaineksen ja noen suodattamiseksi. Kaikki

sammutuksessa käytetty vesi johdettiin sammutusjätevesinäytteiden ottamisen jälkeen kaivon kautta harjoitusalueen prosessijätevesijärjestelmään.

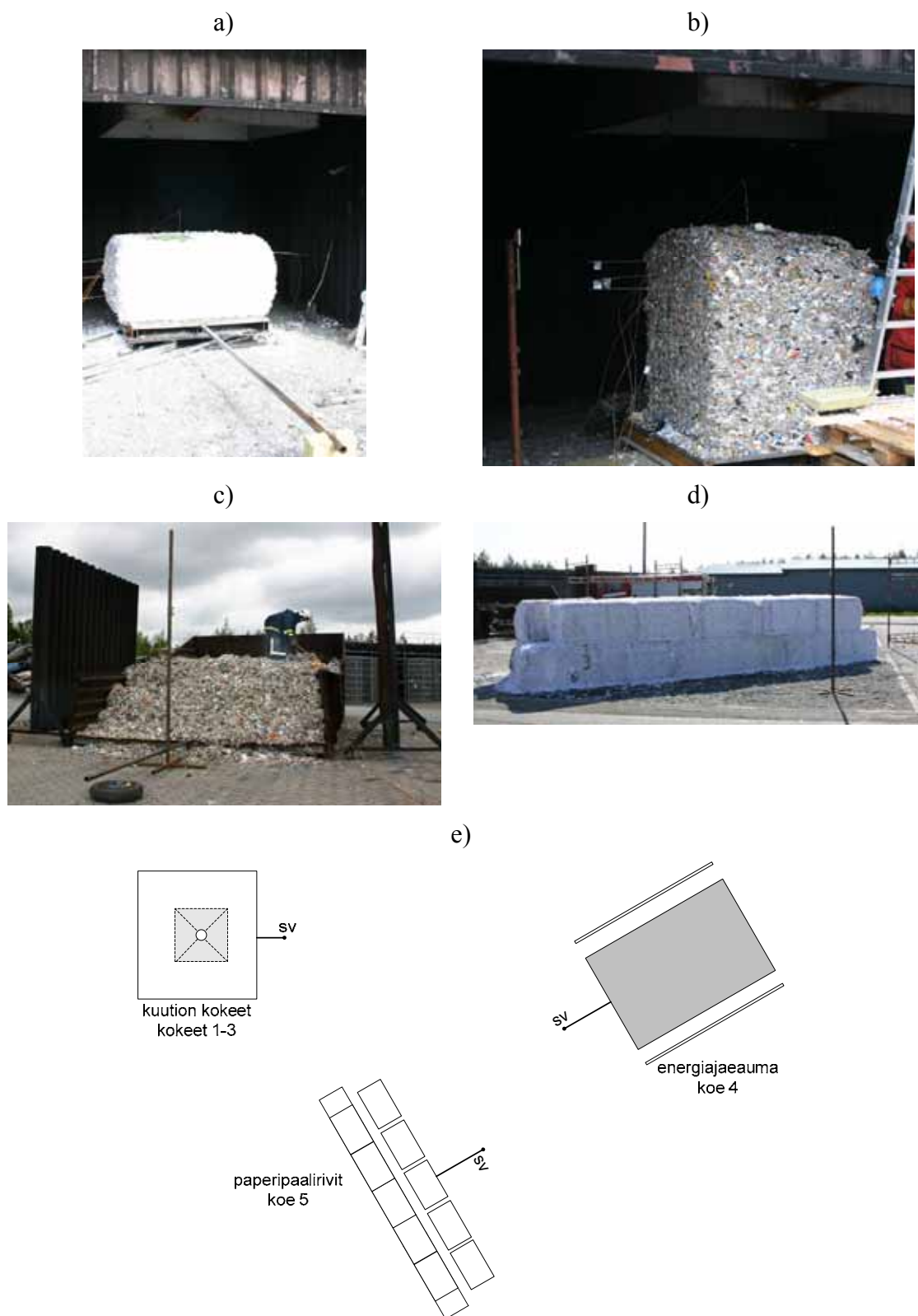
Pelastusopisto teki kokeista ympäristösuojelulain 62 §:n mukaisen ilmoituksen, jonka perusteella Kuopion kaupungin ympäristöjohtaja ratkaisi kokeiden ympäristönsuojeluvaatimukset. Kokeiden järjestämisajankohdista tiedotettiin myös läheiselle Jättekukko Oy:n jätekeskukselle, Pohjois-Savon pelastuslaitokselle ja hätäkeskukseen.

#### **4.2.2 Koejärjestelyt**

Pelastusopiston harjoitusalueella tehtiin ensimmäisellä viikolla 3 ja toisella viikolla 2 polttokoetta. Ensimmäisen viikon kokeet tehtiin ns. ”kuution kokeina”, joissa poltettiin yksittäisiä paperi- ja energiajaepaaleja. Toisella viikolla kokeiden mittakaavaa suurennettiin käyttämällä energiajaekasan poltossa noin 4 × 6 m:n kokoista miilua ja paperipaalien poltoissa kahta 8 m pitkää ja 1,6 m korkeata paaliriviä.

Kussakin kokeessa tehtiin palotekniset mittaukset ja päästömittaukset ilmasta (vapaan palon ja sammutuksen aikainen mittaus) sekä sammutusjätevedestä. Sammuttamisen aikana pyrittiin käyttämään normaalia pienempää vesimäärää, jotta päästömittausten edellyttämä näytetilavuus kuumasta ilmavirtauksesta saataisiin kerättyä.

Kuvissa 19a)–19d) esitetään valokuvia koejärjestelyistä ja kuvassa 19e) koegeometria ylhäältäpäin kuvattuna.



*Kuva 19. Valokuvia suuren mittakaavan kokeista, joissa poltettiin a) yksittäistä paperi- ja b) energijaepaalia sekä c) energijaeaumaa ja d) kahta paperipaaliriviä. Kuvassa e) esitetään suuren mittakaavan polttojen koegeometria ylhäältäpäin kuvattuna (sv = sammutusvesinäytteen ottokohta).*

Taulukossa 12 esitetään suuren mittakaavan kokeiden materiaali, sammutuksessa käytetty sammute ja dimensiot.

*Taulukko 12. Suuren mittakaavan kokeissa käytetty materiaali, sammute ja dimensiot.*

Koe	Materiaali	Sammute	Määrä <sup>a</sup>
1	Paperi	vesi	1 paali (1,6 m × 1,0 m × 0,8 m)
2	ENE	vesi	1 paali (1,1 m × 1,1 m × 1,2 m)
3	ENE	A-vaahdo	1 paali (1,2 m × 1,2 m × 1,4 m)
4	ENE	vesi	auma (6,0 m × 4,0 m × 1,0 m)
5	Paperi	vesi	2 paaliriviä, yht. (8,0 m × 2,4 m × 1,6 m) <sup>b</sup>

<sup>a</sup> suluissa pituus × leveys × korkeus

<sup>b</sup> yhden paalirivin leveys 1,0 m ja paalirivien välissä 0,4 m:n rako

### 4.2.3 Mittaukset

#### 4.2.3.1 Palotekniset mittaukset

Suuren mittakaavan polttokokeissa suoritettiin lämpötila- ja lämpösäteilymittaukset, joiden avulla voidaan arvioida mm. palon leviämistä. Kuution kokeissa käytettiin lisäksi massan mittausta, jonka avulla saatiin arvio palaneen massan määrästä ja palotehosta. Koejärjestelyiden tarkempi kuvaus esitetään liitteessä C.

Kokeissa yksittäisten paalien sytytys tapahtui kokeessa 1 paalin päältä ja kokeissa 2 ja 3 paalin päältä sekä paalien sivuilta alhaalta. Paalien päältä tapahtuneessa sytytyksessä apuna käytettiin LIAV-sytytysnestettä (puhdistettua teollisuusbensiiniä). Kokeessa 4 (energiajaeauma) sytytys tapahtui energiajaeauman takareunasta useasta eri kohdasta. Kokeen 5 eli paperipaalirivien sytyttäminen tapahtui paalirivien väliin muodostuneessa ”ontelotilassa”.

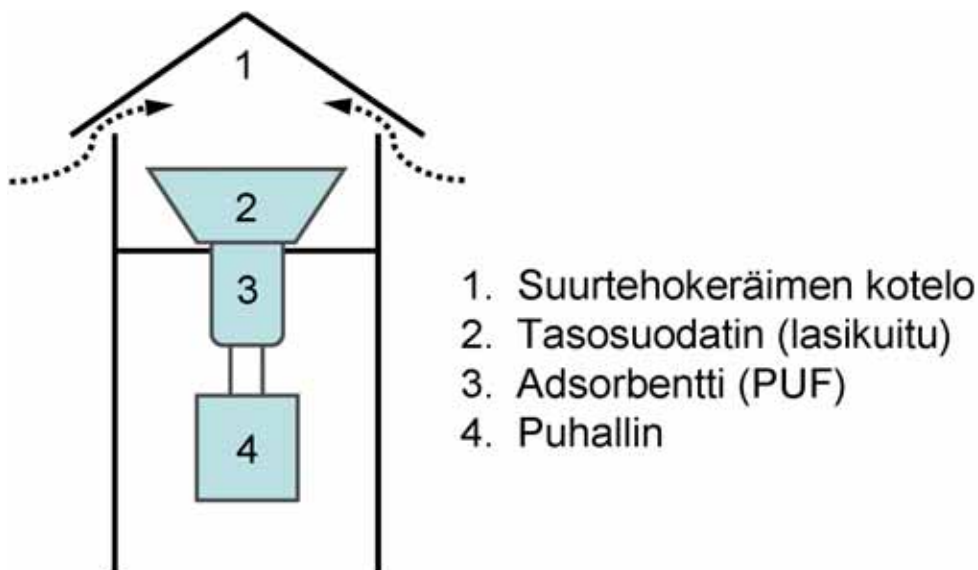
#### 4.2.3.2 Ilmaan vapautuvat haitalliset yhdisteet

Suuren mittakaavan koejärjestelyissä ns. ”kuution kokeissa” näytteenotto oli vastaava kuin pienen mittakaavan kalorimetrikokeissa perustuen SFS-EN 1948-1 ja ISO 11338-1:2003 standardeihin. Kuution kokeissa savukaasunäyte kerättiin huuven poistokanavasta isokineettisesti käyttäen näytteenotossa lämmitettyä lasisondia. Kanavan ulkopuolinen näytteenottolinja ja suodatin (ET/MK360, Munktell) oli lämmitetty noin 160 °C:seen. Suodattimen jälkeen näytekaasu lauhdutettiin 10–15 °C:seen, ja kaasufaasissa esiintyvät yhdisteet kerättiin XAD-2-adsorbenttiin. Näytteenottoaika palo- ja sammutusvaiheessa

oli 30 minuuttia ja näytekaasun määrä 350–440 l. Huuvan poistokanavasta mitattiin näytteenottohetkellä myös savukaasun virtausnopeus pitot-putkella ja savukaasu-analysaattorilla (Testo 350), CO- ja O<sub>2</sub>-pitoisuudet ja savukaasun lämpötila.

Harjoituskentällä tehdyissä isoissa kenttäkokeissa näytteenottoon sovellettiin ISO 12884:2000 standardia. Periaatekuva kenttäkokeiden näytteenotosta on esitetty kuvassa 20. Näytteenotossa käytettiin suurtehokeräintä, joka koostui suuresta lasikuituisesta taso-suodattimesta (MG 160, Munktell) ja PUF-keräimestä (Polyurethane foam, URG). Suurtehokeräimellä kerättiin ilmanäytteet palon ja sammutuksen aikana suoraan savuvanasta muutaman metrin etäisyydellä palosta. Näytteenottoaika palo- ja sammutusvaiheessa oli 30–95 min ja näytekaasun määrä 9–39 m<sup>3</sup>. Koko kokeen aikana kerättiin myös kenttänäyte tuulen alapuolelta muutaman kymmenen metrin etäisyydeltä. Kenttä-näytteen näytteenottoaika oli 110–160 min ja näytekaasun määrä 23–31 m<sup>3</sup>.

Näytteiden uutto ja analysointi tehtiin pääasiassa Kuopion yliopistolla ympäristötieteiden laitoksella. Näytteistä analysoitiin samat yhdisteet kuin pienen mittakaavan kokeissa. Dioksiini- ja furaaniyhdisteiden analyysit teetettiin Kansanterveyslaitoksella Kuopion yksikössä.



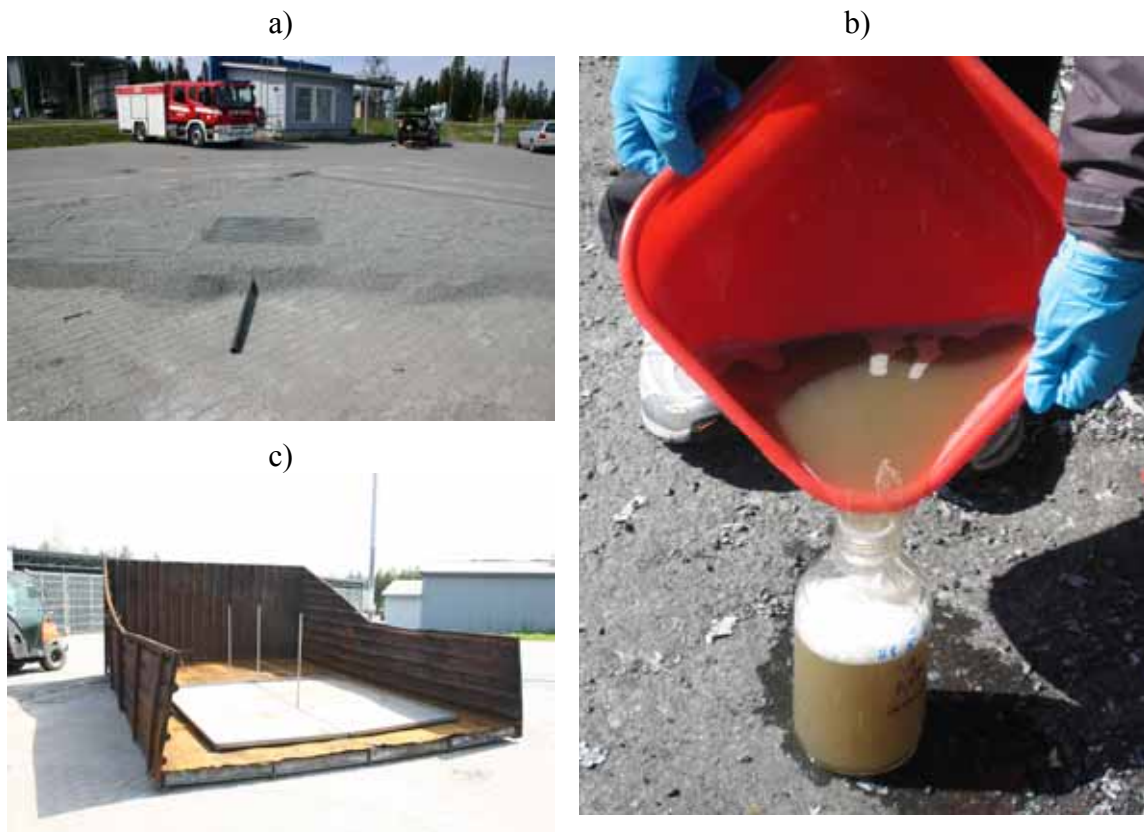
Kuva 20. Kaaviokuva kenttäkokeiden päästönäytteenotosta (suurtehokeräin).

#### 4.2.3.3 Sammutusjätevedet

Sammutusvesi otettiin harjoitusalueen sammutusvesijärjestelmään yhdistetystä palopostista. Vesi pumpataan järjestelmään harjoitusalueen lammesta ja ohjataan sammutuskäyttöön pelastusyksiköihin sijoitetuilla palopostikalustolla, letkuilla ja liittimillä. Paine korotettiin tarvittavaan työskentelypaineeseen pelastusyksikköön sijoitetulla pumpulla.

Sammutusvesinäytteiden ottamisen helpottamiseksi valmistettiin teräksiset keräysaltaat poltettavien materiaalien alle. Keräysaltaat kuution kokeissa sekä paperipaalikasan alla olivat kooltaan 1,5 x 1,5 m ja niiden päällä oli teräksinen ritilätaso (kuva 21a). Energiajakekan alla miilussa käytettiin kooltaan 3 x 3 m keräilyallasta ilman ritilätasoa (kuva 21c). Sammutusvesi ohjattiin altaista 3 m:n etäisyydelle 2 tuuman teräsputkea pitkin muoviseen astiaan, josta Kuopion yliopisto otti laboratorioissaan analysoitavat näytteet lasipulloihin (kuva 21b).

Sammutusjätevesinäytteet kerättiin pestyihin yhden litran lasipulloihin kunkin kokeen sammutuksen alkuvaiheessa. Jokaisesta kokeesta otettiin analyysiä varten kaksi litraa vettä. Lisäksi sammutusvedestä otettiin nollanäyte suoraan sammutusauton vesisäiliöstä. Ennen kemiallista analyysiä sammutusvesinäytteiden kiintoaines suodatettiin pois. Suodatetuista vesinäytteistä tehtiin samat kemialliset analyysit kuin ilmanäytteistäkin.



*Kuva 21. a) Kokeessa 5 käytetty sammutusjätevesien keräysallas ja teräsputki hiekkapatjaan aseteltuina, b) Sammutusjätevesien muovinen keräysastia ja näytteen siirto lasipulloon kokeen 3 jälkeen, c) 3 x 3 metrin sammutusjätevesien keräysallas ja miilu ennen energiajakeen asettelua ja instrumentointia (koe 4).*



#### 4.2.3.4 Sammutus

Pelastuslaitokset käyttävät jätekeskusten palojen sammuttamiseen samoja perinteisiä menetelmiä kuin muidenkin tulipalojen sammuttamiseksi. Käytetyimmät sammutusmenetelmät ovat sammutus vedellä jäähdyttämällä ja sammutusraivaus. Sammutusveden tunkeutumiskykyä voidaan parantaa lisäämällä joukkoon veden pintajännitystä pienentävää lisäainetta. Jätepenkkojen syväpaloja voidaan sammuttaa myös ajamalla ja tiivistämällä maata jätteiden päälle, jolloin käytetty sammutusmenetelmä on tukahdutus.

Kaikissa suuren mittakaavan sammutuskokeissa käytettiin samaa kalibroitua monitoimisuihkuputkea, yhtä työjohtoa (sisähalkaisija 38 mm) ja pumppua. Kokeissa käytetty suihkuputki ja palopumppu ovat yleisesti suomalaisten pelastuslaitosten käytössä. Pelastusyksikköön kiinteästi asennetun pumpun paine pidettiin vakiona koko sammutustyön ajan automatiikan avulla, pumpun voimanlähteenä toimivan auton moottorin kierrosluvun vaihdella (kuva 22).

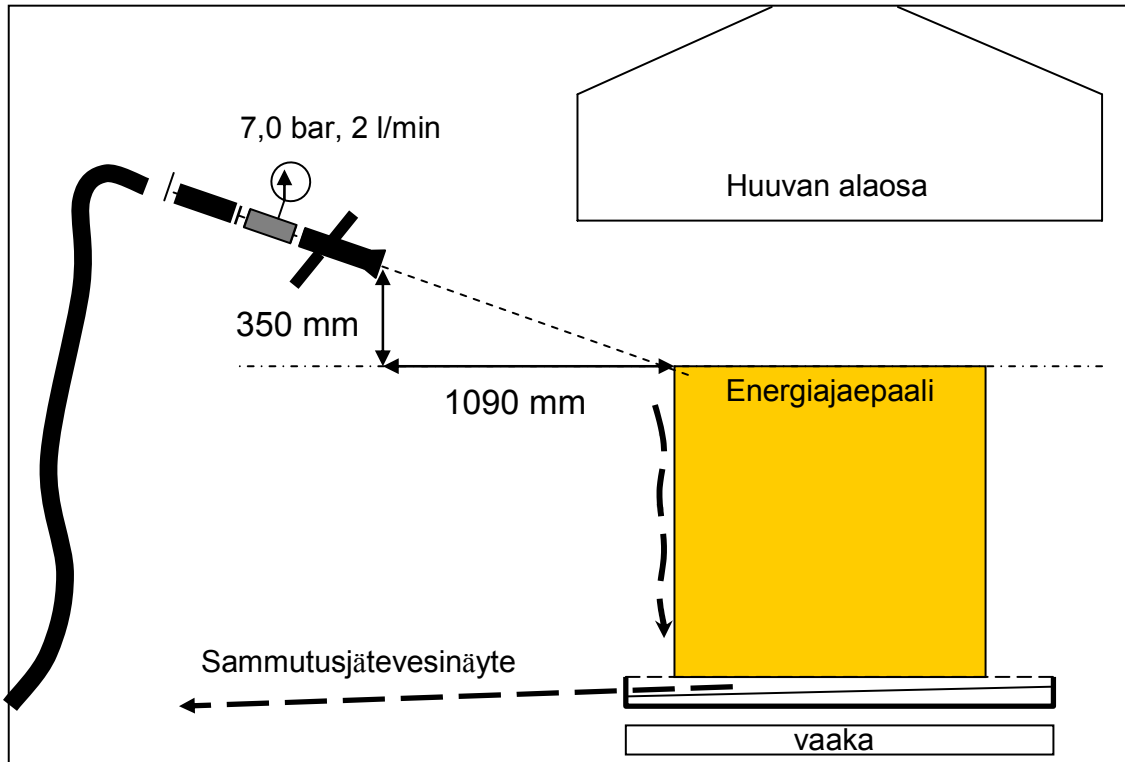


*Kuva 22. Sammuttamisessa käytetty pumppu ja paineensäätöautomaatiikka.*

Kokeissa käytetyn suihkuputken yksi sisäänrakennettu ominaisuus on automaattinen suihkupaineen säätö, joka pitää suihkupaineen vakioarvossa riippumatta syöttöpaineen vaihteluista. Suihkuputken liukuventtiilin ansiosta putki toimii lineaarisesti koko virtausalueella 40–500 l/min eikä venttiilin nopeakaan avaaminen tai sulkeminen aiheuta palloventtiileiden tavoin paineiskuja. Virtaamaa ja suihkukulmaa säädettiin kokeissa putken ulkopuolelle runkoon ja virtauksen säätimeen valmiiksi tehtaalla tehtyjen porausten ja jousikuormitteisten kuulien avulla.

Kuution kokeiden (kokeet 1–3) sammutusasetelma suunniteltiin siten, että se vastaisi mahdollisimman hyvin suuren jättekasan sammutusta pienemmässä mittakaavassa toteutettuna. Jätepaaleja varastoidaan usein kohdakkain pinottuina kolmesta neljään – joskus jopa kuusikin – kerrosta päällekkäin. Jotta näin korkeat paalikasat pysyisivät pystyssä, ne tuetaan seinää tai toista paaliriviä vasten. Näin muodostuvan seinämän alimmaisiiin paaleihin ei sammutetta voi levittää käytännössä kuin yhdeltä sivulta edestä. Päällimmäisiin paaleihin sammutteen voi suihkuttaa myös yläpuolelta. Sammuttamisen edetessä paalikasa voidaan purkaa koneellisesti, minkä jälkeen sammutetta päästään levittämään muillekin paalin sivuille. Energiajaetta varastoidaan sekä paaleina että irtotavarana. Kuution kokeita varten energiajaje toimitettiin paikalle paaleina. Käytännön tilanteessa sammutusvettä levitetään palon alkuvaiheessa sinne missä liekkiä näkyy, jolloin sammutusvesivirtaama yksittäiseen paaliin ei ole jatkuva.

Kuution kokeissa suihkuputki oli asennettu kiinteästi telineeseen. Suihkukulmana käytettiin suihkuputken valmistajan turbiinirenkaattomalle suutinosalle esiasettamaa noin 40 asteen suihkukulman pikavalintaa eli ns. hyökkäyssumuausentoa. Sammutus kuution kokeissa suoritettiin päästömittausten vuoksi hyvin pienellä 2 l/min sammutusvesivirtaamalla. Näin pieni virtaama saavutettiin valitsemalla vakiovirtaus 40 l/min ja jaksottamalla sammuttamista rytmillä 3 s auki – 57 s kiinni. Sumusuihku kohdistettiin poltettavan paalin sivuun lähietäisyydeltä yläviistosta (kuva 23). Varsinaisia sammutuskokeita edeltäneissä kalibrointitesteissä Pelastusopistolla suihkuputken virtaamanvalitsimen arvolla 40 tuotti tasan 40 l/min käytettäessä yhtä sisähalkaisijaltaan 38 mm:n ja pituudeltaan 20 m:n työjohtoa ja 7 baarin pumppupainetta. Työjohdon päähän välittömästi ennen suihkuputkea asennettu nestevoimennettu painemittari näytti kokeen aikana myös tasan 7 bar.



Kuva 23. Kokeissa 2 ja 3 sammuttaminen suoritettiin lähietäisyydeltä kapealla sumu-  
kulmalla kiinteältä telineeltä yläviistosta noin 18 °:n kulmassa.

Kuution kokeiden 2 ja 3 välillä tutkittiin energijakeen palon sammutuksen yhteydessä ilmaan ja sammutusjäteveteen kulkeutuvia yhdisteitä, kun sammutteena käytettiin pelkkää vettä (koe 2) ja A-vaahtoa (koe 3). Synteettisen vaahdonesteen valmistaja suositteli vaahdotepitoisuudeksi 0,5...1,0 til.-%. A-vaahdotetta lisättiin 0,5 til.-% eli 12,5 l suoraan pelastusyksikön 2 500 l:n puolillaan olleeseen säiliöön koetta 3 edeltävänä iltana. Säiliö täytettiin vaahdotteen lisäämisen jälkeen vedellä harjoitusalueen palopostiverkostosta, joten seos ennätti sekoittua täydellisesti ja saavuttaa tavoitellun 0,5 til.-%:n vaahdotepitoisuuteensa. Sammuttamisen aikana kuution kokeissa pidettiin suihkausten lukumäärästä mittauspöytäkirjaa sekä tallennettiin koe videokameralla. Kokeissa 2 ja 3 sammutuksen aikaisia päästöjä ilmaan mitattiin 30 min ajan. Sammutukseen käytettiin vettä sekä A-vaahtoa molempia  $30 \times 2$  l eli yhteensä 60 l.

Energijaeauaman (koe 4) ja paperipaalikasan (koe 5) sammutuksessa käytettiin päästömittausten aikana pelkkää vettä. Työsuihkua käytettiin käsivaralta tarpeen mukaan. Sammuttamisen aikana ei pidetty erikseen mittauspöytäkirjaa. Sammuttamisen kokeiden aikana käytetty kokonaisvesimäärä saatiin laskettua kertomalla suihkuputken sammutusvesivirtaama [l/min] videotallenteelta yhteenlasketulla ajalla [min], jonka suihkuputki oli auki. Nämä laskennallisesti muodostetut kuvaajat on esitetty sammutustuloksina jäljempänä kohdassa 4.2.4.6.

## 4.2.4 Tulokset

### 4.2.4.1 Palotekniset mittaukset, Koe 1

Kokeen 1 eli yhden paperipaalin palamisesta otetut valokuvat eri ajanhetkinä esitetään kuvassa 24. Kyseisenä päivänä vallitsi vesisade, jonka johdosta ilmankosteus oli suuri. Tämä mahdollisesti vaikutti myös paperipaalin pinnan palamiseen. Paperipaalin pinta paloi ainoastaan noin neljäsosan eikä palon leviäminen ja palaminen ollut voimakasta. Jotta päästömittauksiin (vapaan palon ja sammutuksen vaihe) voitiin tuottaa riittävä näytemäärä, tarvittiin riittävän pitkä palamisaika ja siten paperipaalin palamista oli au-  
tettava hetkittäin ulkoisella lämmönlähteellä.

2 min



7 min

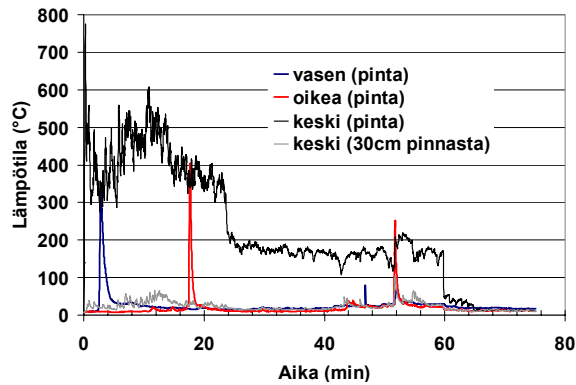


8 min



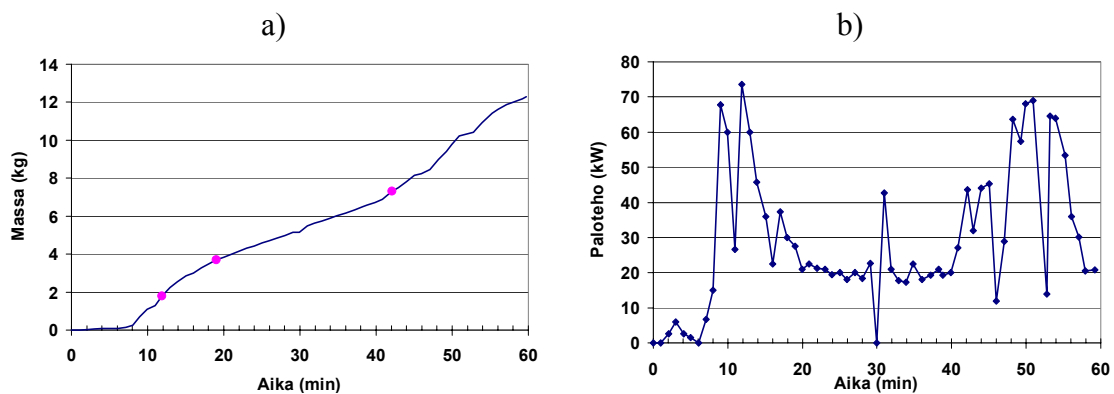
*Kuva 24. Kokeen 1 (yksi paperipaali) valokuvia sytytyshetken jälkeen eri ajanhetkinä.*

Kuvassa 25 esitetään paperipaalin pinnassa ja pinnan lähellä olleiden lämpötilantureiden lämpötilat sytytyshetkestä eteenpäin. Korkeimmat lämpötilat esiintyvät sytytyskohdassa, jossa sytytyslähde paloi n. 20 min ajan. Liekkirintaman eteneminen nähdään vasemman puoleisen, pinnasta mitatun, lämpötila-anturin hetkellisenä lämpötilapiikkinä n. 3 min kohdalla. Liekkirintaman vaakasuuntainen etenemisnopeus on tällöin ollut n. 15 cm/min (2,5 mm/s). Päästömittausten ajankohta vapaan palon aikana ajoittuu n. 9 min 30 s – 39 min 30 s välille ja sammutuksen aikana 60–75 min välille.



Kuva 25. Kokeen 1 (paperipaali) lämpötilat pinnasta ja pinnan läheltä mitattuna.

Paperipaalin palanut massa ja arvio palotehosta esitetään kuvassa 26. Palotehoarvio on laskettu massavirran (kg/s) ja kartiokalorimetrikokeiden tehollisen lämpöarvon (8 400 kJ/kg) tulona. Kuten palotehosta (kuva 26b) nähdään, ei palaminen ollut voimakkaammillaan kuin noin 70 kW. Tasolla 20 kW palaminen oli pääasiassa kytemistä.



Kuva 26. Kokeen 1 (paperipaali) a) palanut massa ja b) massan muutoksen ja tehollisen lämpöarvon avulla määritetty paloteho ennen sammutusvaihetta. Kuvassa a) esitetty pisteinä ajankohdat, jolloin ulkoisella lämmönlähteellä pyrittiin pitämään liekehtivää paloa yllä.

#### 4.2.4.2 Palotekniset mittaukset, Kokeet 2 ja 3

Kokeissa 2 ja 3 poltettiin kummassakin yhtä energiajaepaalia. Koe 2 suoritettiin samana päivänä kuin koe 1. Kokeista 2 ja 3 otettuja valokuvia esitetään kuvissa 27 ja 28. Toisen päivän kokeessa 3 paali paloi paremmin kuin kokeessa 2, mikä on nähtävissä myös 4–5 min välillä otetuista valokuvista.

1 min



5 min



9 min



28 min



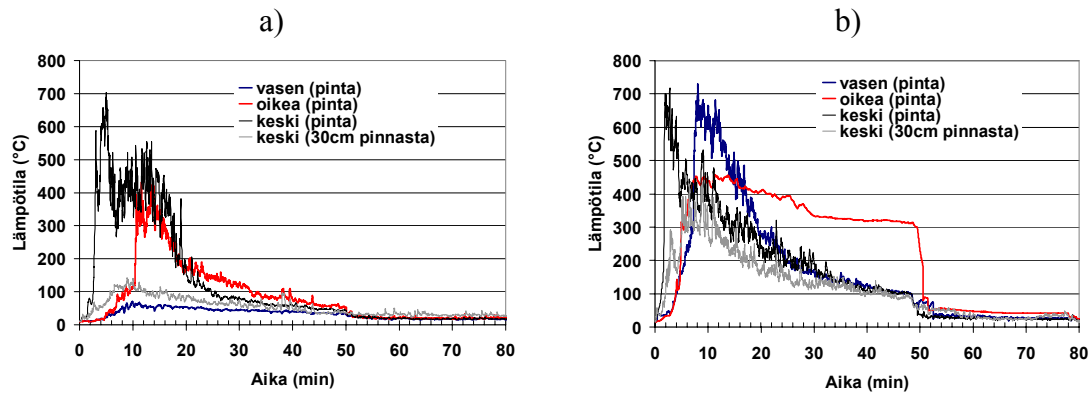
*Kuva 27. Kokeen 2 (energiajapaali) valokuvia eri ajanhetkinä sytytyksen jälkeen.*





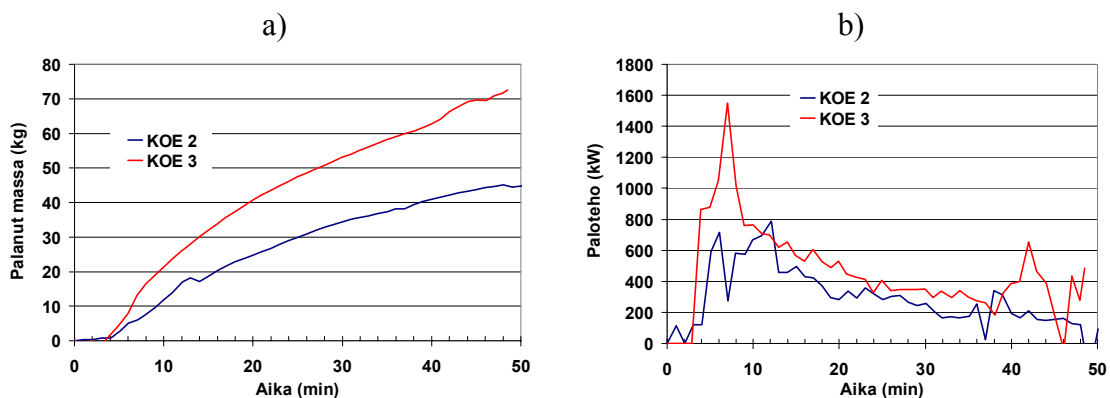
*Kuva 28. Kokeen 3 (energiajaepaali) valokuvia eri ajanhetkinä sytytyksen jälkeen.*

Kokeiden 2 ja 3 lämpötilat energiajaepaalin pinnasta ja pinnan yläpuolelta esitetään kuvassa 29. Lämpötilat olivat kauttaaltaan korkeammat kokeessa 3 (kuva 29b) verrattuna kokeeseen 2, mikä osoittaa palamisen olleen voimakkaampaa. Vapaan palamisen aikaiset päästömittaukset tehtiin 5–35 min välillä kokeissa 2 ja 3 ja sammutuksen aikaiset päästömittaukset n. 50–80 min kohdalla. Paalin pinnasta mitattujen lämpötilalukemien perusteella vaakasuuntainen liekkirintaman nopeus on vaihdellut n. 3,5–7,8 cm/min välillä.



Kuva 29. Kokeen a) 2 ja b) 3 (energiajapaali) lämpötilat pinnasta ja pinnan läheltä mitattuna.

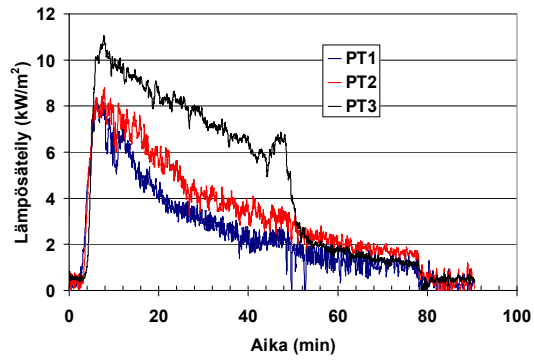
Vastaavasti kuin kokeessa 1 kuvassa 30 esitetään kokeissa 2 ja 3 poltettujen energiajapaalien palaneet massat ja palotehoarviot. Kuvista näkee hyvin, kuinka palon alkuvaiheessa kokeen 3 palaminen on ollut, massan kulutukseen perustuen, arviolta kaksi kertaa nopeampaa kuin kokeessa 2.



Kuva 30. Kokeissa 2 ja 3 a) palanut massa ja b) massan muutoksen ja tehollisen lämpöarvon avulla määritetyt palotehot ennen sammutusvaihetta.

Lämpösäteilyarvot esitetään ainoastaan kokeen 3 tuloksista, koska kokeissa 1 ja 2 lämpötilat eivät olleet kyllin suuria tai lämpötila-altistus oli lyhytaikainen aiheuttamaan PT-anturin lämpötilaan muutoksia. Kuvan 31 lämpösäteilyarvoista havaitaan, että PT-antureihin on kohdistunut n.  $11 \text{ kW/m}^2$  hetkellinen lämpösäteily (lämpövirrantiheys). Lämpötila-lämpösäteilymuunnoksessa käytettyjen muuttujien lukuarvojen perusteella voidaan sanoa ko. säteilytason olleen vähintään edellä esitetty suuruinen.

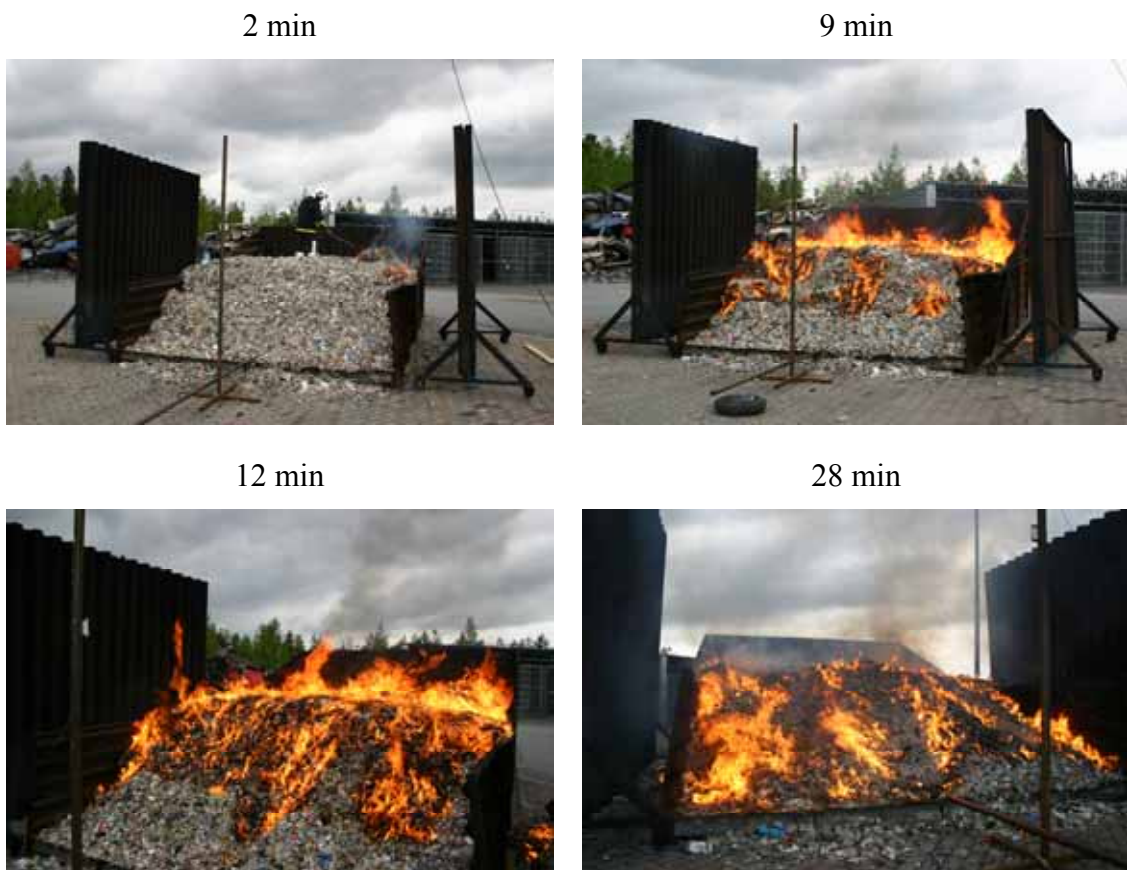




Kuva 31. Kokeessa 3 (energiajapaali) mitatut lämpösäteilyarvot.

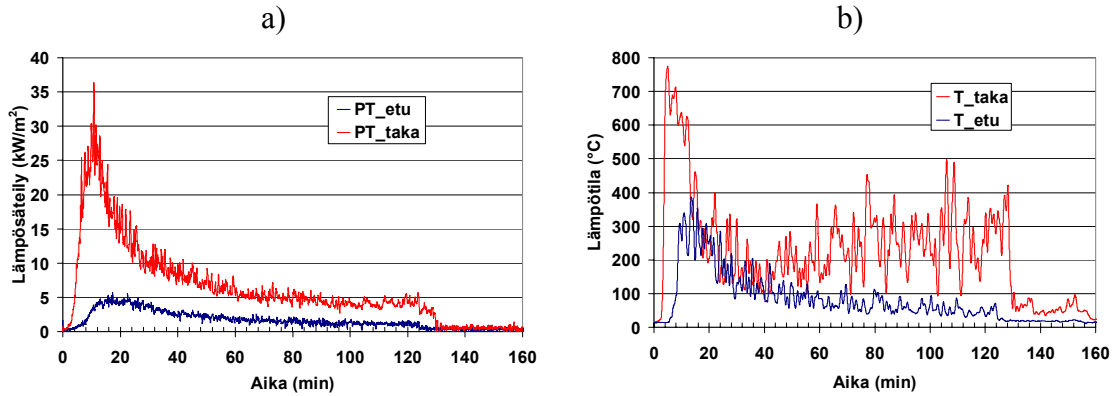
#### 4.2.4.3 Palotekniset mittaukset, Koe 4

Kokeessa 4 poltettiin energiajaeaumaa, jossa paloteknisinä mittauksina käytettiin lämpötila-antureita ja PT-antureita. Vaakaa ei käytetty kokeissa 4 ja 5. Kuvassa 32 esitetään kokeesta 4 otettuja valokuvia eri ajanhetkinä.



Kuva 32. Kokeen 4 (energiajaeauma) aikaisia valokuvia eri ajanhetkinä.

Kuvassa 33 esitetään kokeen 4 aikaiset pintalämpötila- ja lämpösäteilyarvot auman etu- ja takaosassa (mittauspisteet esitetty liitteessä C). Sammutus on tapahtunut aikavälillä 124–154 min.



Kuva 33. Kokeen 4 (energiajaeauma) tuottama a) lämpösäteily ja b) pintalämpötilat auman/miilun etu- ja takaosassa.

#### 4.2.4.4 Palotekniset mittaukset, Koe 5

Kokeessa 5 poltettiin kahta paperipaaliriviä, joiden välissä oli 0,4 m:n ilmarako. Kuvassa 34 esitetään valokuvia polttokokeesta. Palo eteni hyvin nopeasti sytytyksen jälkeen paalirivien välisessä ontelotilassa, ja jo n. 1 min kuluttua sytytyksestä palon laajuus oli noin puolet ontelorivin pituudesta. Varsin pian sytytyksen jälkeen palo myös hiipui, ja noin 5 min kohdalla ja siitä eteenpäin paalirivistö kyti muodostaen sankkaa savua.

1 min



2 min



3 min

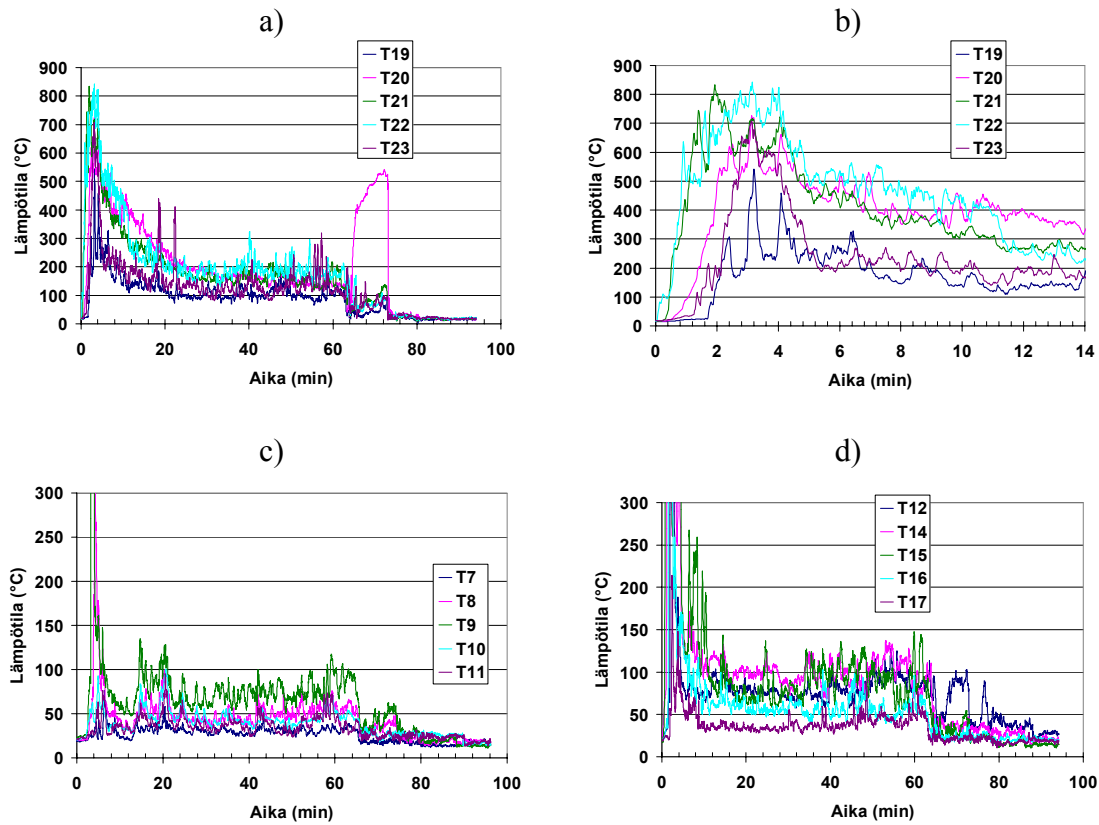


5 min



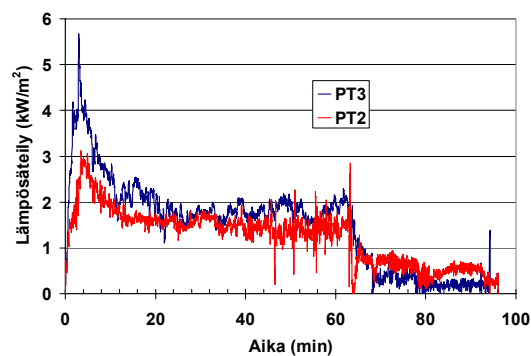
*Kuva 34. Kokeen 5 (paperipaalirivit) aikana otettuja valokuvia eri ajanhetkinä sytytyksen jälkeen.*

Kuvissa 35a ja 35b esitetään lämpötilat paalirivien välisessä ilmatilassa ja kuvissa 35c ja 35d lämpötilat paperipaalirivien päällä. Myös lämpötiloista voidaan havaita se, ettei liekehtivää palamista esiintynyt kokeessa n. 10 min jälkeen. Liekkirintaman nopeutta paalirivien välissä voidaan tarkastella kuvasta 35b, josta kohoavien lämpötilojen avulla nähdään, miten nopeasti tuli etenee kapeassa ontelotilassa (sytytyskohta anturien T21 ja T22 välissä, ks. liite C). Liekkirintama etenee tässä tapauksessa pysty- ja pituussuunnassa, jolloin eteneminen on huomattavasti nopeampaa kuin aiemmissa kokeissa. Liekkirintaman nopeudeksi voidaan arvioida n. 1–2 m/min.



Kuva 35. Kokeen 5 (paperipaalirivit) lämpötilat paperipaalirivien välissä a) koko kokeen ajalta, b) ensimmäisten minuuttien ajalta, c) ja d) lämpötilat paperipaalien päällä koko kokeen ajalta.

Kokeessa 5 mitattujen lämpösäteilyjen osalta kuvasta 36 havaitaan, ettei 3 m:n etäisyydelle asennettuihin PT-antureihin kohdistu suurimmillaan kuin  $5 \text{ kW/m}^2$ :n tasoinen säteily.



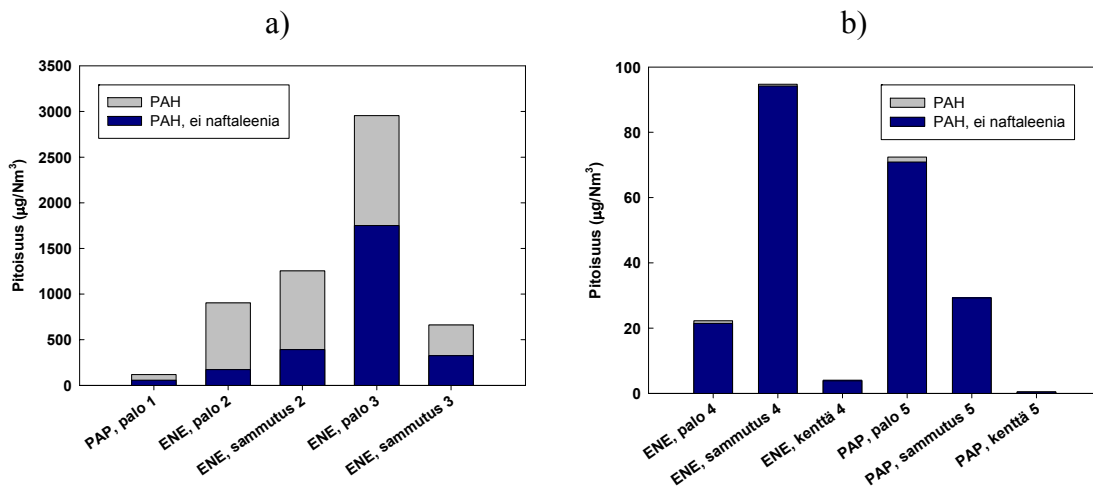
Kuva 36. Kokeen 5 (paperipaalirivit) lämpösäteilyarvot 3 m:n etäisyydellä palosta.

#### 4.2.4.5 Ilmaan vapautuvat haitalliset yhdisteet

Suuren mittakaavan kokeiden savukaasunäytteistä analysoitujen yhdisteiden kokonaispitoisuudet on esitetty kuvissa 37–41a ja b.

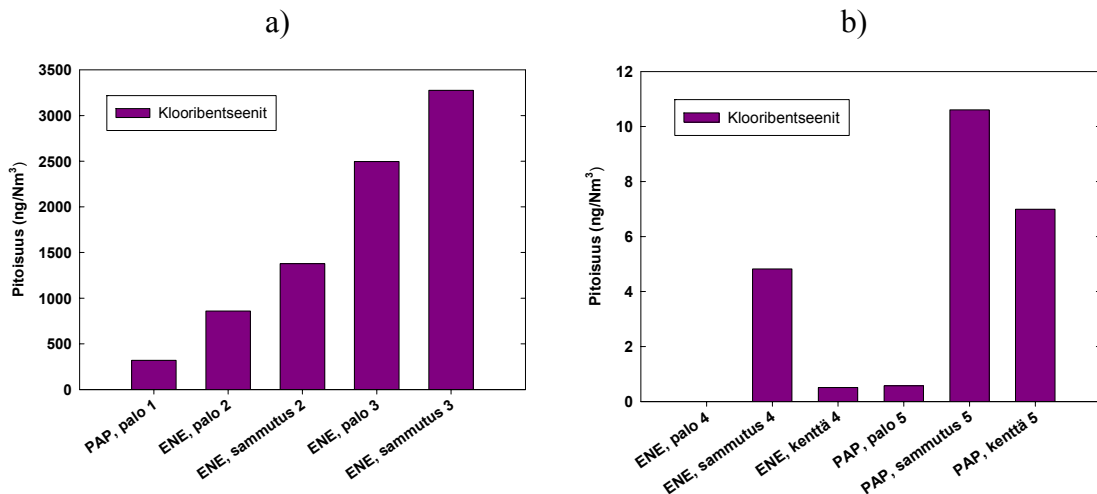
PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuudet vaihtelivat kuution kokeiden savukaasunäytteissä 119–2 955  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  välillä (Kuva 37a). Energiajakeella (ENE) päästöt olivat selvästi suuremmat kuin keräyspaperilla (PAP). Kenttäkokeissa PAH-pitoisuudet vaihtelivat palon ja sammutuksen aikana 22–95  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  välillä. Taustapitoisuus palokentällä vaihteli 0,4–4  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  välillä (Kuva 37b). Suurimmat päästöt olivat ENE-kokeen sammutuksen ja PAP-kokeen palona aikana. Näissä näytteissä hiukkasfaasin PAH-pitoisuudet olivat myös 5–10 kertaa suuremmat verrattuna ENE-palo- tai PAP-sammutuskokeisiin.

Naftaleenin osuus kokonaispitoisuudesta kuution kokeissa oli 40–80 %, kun taas kenttäkokeissa sen osuus oli vain pari prosenttia. Yleensä kaasufaasin osuus oli kuution kokeissa selvästi suurempi (yli 90 %) kuin kenttäkokeissa. Kenttäkokeiden aikana kerätyissä näytteissä kaasufaasin osuudet vaihtelivat 20–80 %. Benzo(a)pyreenin pitoisuudet kuution kokeissa vaihtelivat 0,7–7,9  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  ja kenttäkokeissa 0,5–3,3  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ .



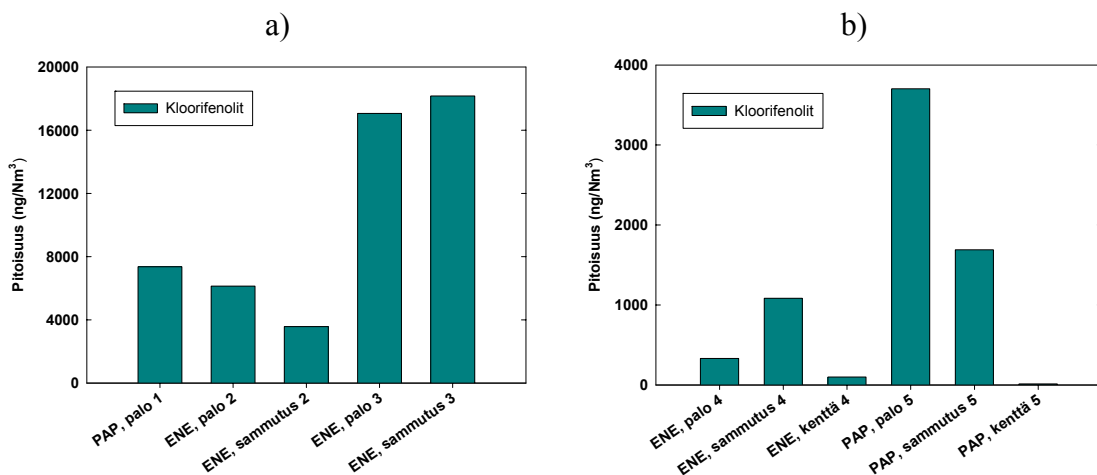
Kuva 37. PAH-yhdisteiden pitoisuus a) kuution kokeissa, b) kenttäkokeissa.

Klooribentseeniyhdisteiden kokonaispitoisuudet vaihtelivat kuution kokeiden savukaasunäytteissä 0,3–3,3  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  välillä (Kuva 38a). Kenttäkokeissa klooribentseenien pitoisuudet olivat hyvin pienet (1–11  $\text{ng}/\text{Nm}^3$ ). Kaikista energiajakeen kenttäkokeiden näytteistä ei pystytty määrittämään klooribentseeneitä näytematriisiin epäpuhtauksista johtuen (Kuva 38b). Kaikissa näytteissä kokonaispitoisuus koostui lähinnä yksinomaan kaasufaasin mono- ja diklooribentseeneistä.



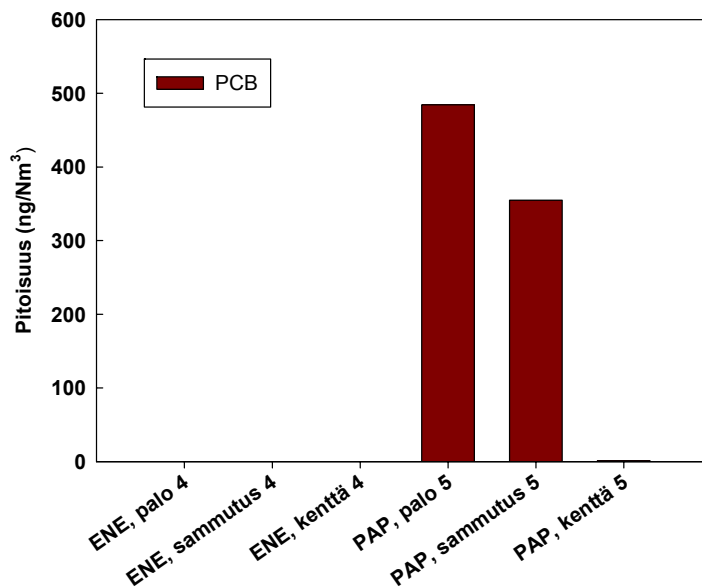
Kuva 38. Klooribentseenien pitoisuus a) kuution kokeissa, b) kenttäkokeissa. Kaikkia ENE-kokeiden klooribentseeninäytteitä ei pystytty analysoimaan.

Kloorifenolien kokonaispitoisuudet vaihtelivat kuution kokeiden savukaasunäytteissä 3,6–18,2 µg/Nm<sup>3</sup> välillä (Kuva 39a). Kenttäkokeissa pitoisuudet vaihtelivat palon ja sammutuksen aikana 0,3–3,7 µg/Nm<sup>3</sup> välillä. Taustapitoisuus palokentällä oli noin 0.1 µg/Nm<sup>3</sup> (Kuva 39b). Kloorifenolipäästöt koostuivat lähinnä kaasufaasin mono- ja dikloorifenoleista (yli 90 % päästöistä). Kenttäkokeissa kierrätyspaperin kloorifenolipäästöt olivat 2–10-kertaiset ENE-materiaaliin verrattuna.



Kuva 39. Kloorifenolien pitoisuus a) kuution kokeissa, b) kenttäkokeissa.

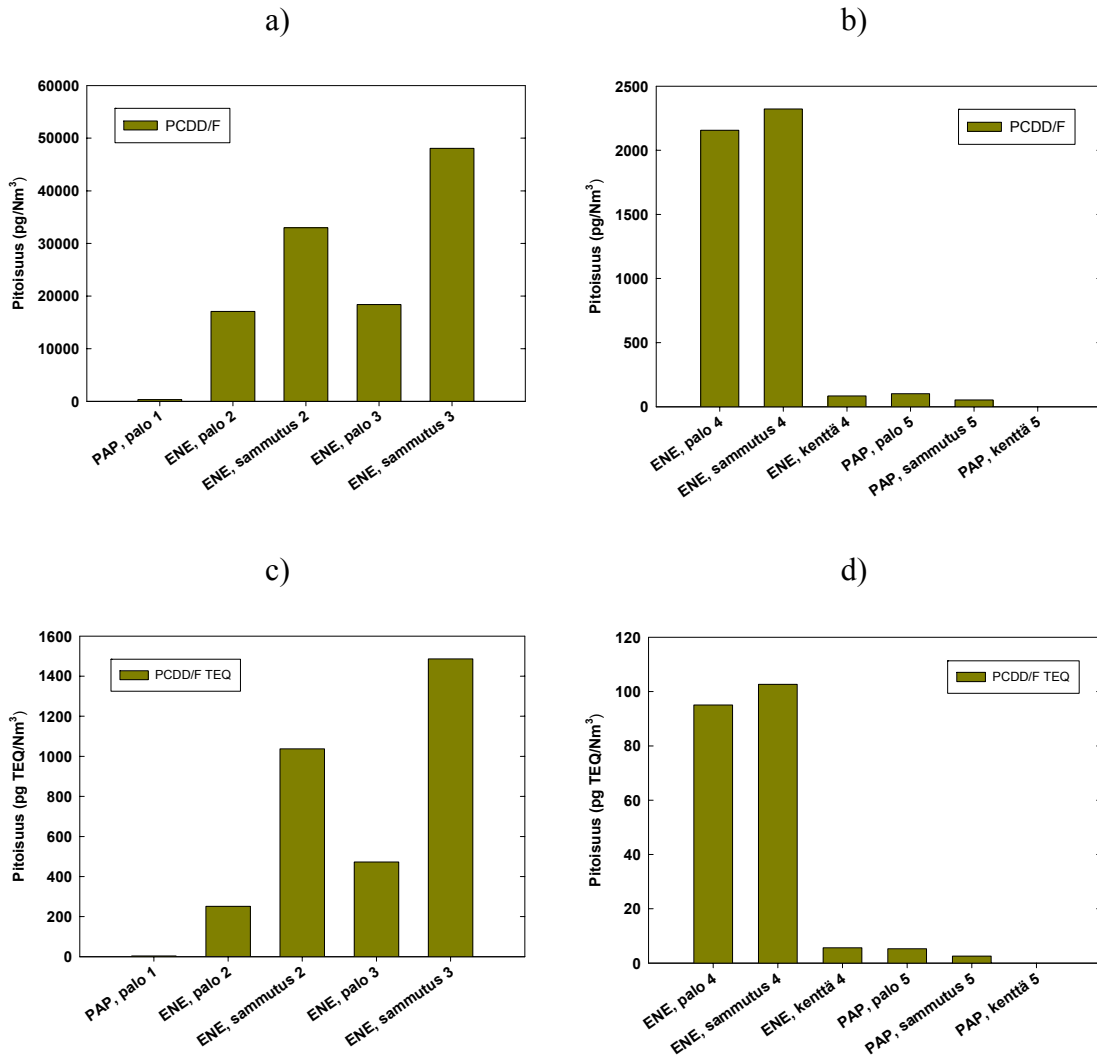
PCB-yhdisteitä löydettiin vain kierrätyspaperilla tehdyistä kenttäkokeiden savukaasunäytteistä (Kuva 40). Palon ja sammutuksen aikana kerätyissä näytteissä PCB-yhdisteiden kokonaispitoisuus vaihteli 0,4–0,5 µg/Nm<sup>3</sup> välillä. PCB-päästöt koostuivat lähinnä tri- ja tetrakloori bifenyyleistä. Palon aikana otetussa näytteessä hiukkasfaasin PCB-osuus oli yli 70 %, kun taas sammutuksen aikana otetun näytteen osuus oli vain 10 %.



Kuva 40. PCB yhdisteiden pitoisuus kenttäkokeissa. Kaikkia ENE-kokeiden PCB-yhdisteitä ei pystytty analysoimaan.

Dioksiinien ja furaanien kokonaispitoisuudet vaihtelivat kuution kokeiden savukaasunäytteissä 0,3–48,1 ng/Nm<sup>3</sup> välillä (Kuva 41a). Kenttäkokeissa pitoisuudet vaihtelivat palon ja sammutuksen aikana 0,1–2,3 ng/Nm<sup>3</sup> välillä. Taustapitoisuus palokentällä ENE-kokeen aikana oli 0,1 ng/Nm<sup>3</sup> (Kuva 41b). Selkeästi suurimmat PCDD/F-päästöt olivat energiajakeella sekä kuution kokeissa että kenttäkokeissa. Kuution kokeissa päästö oli 50–150-kertainen ja kenttäkokeissa noin 20-kertainen kierrätyspaperiin verrattuna. Kuution kokeissa PCDD/F-yhdisteet olivat jakaantuneet kaasun- ja hiukkasfaasiin, kun taas kenttäkokeissa PCDD/F-yhdisteet esiintyivät lähes ainoastaan hiukkasfaasissa.

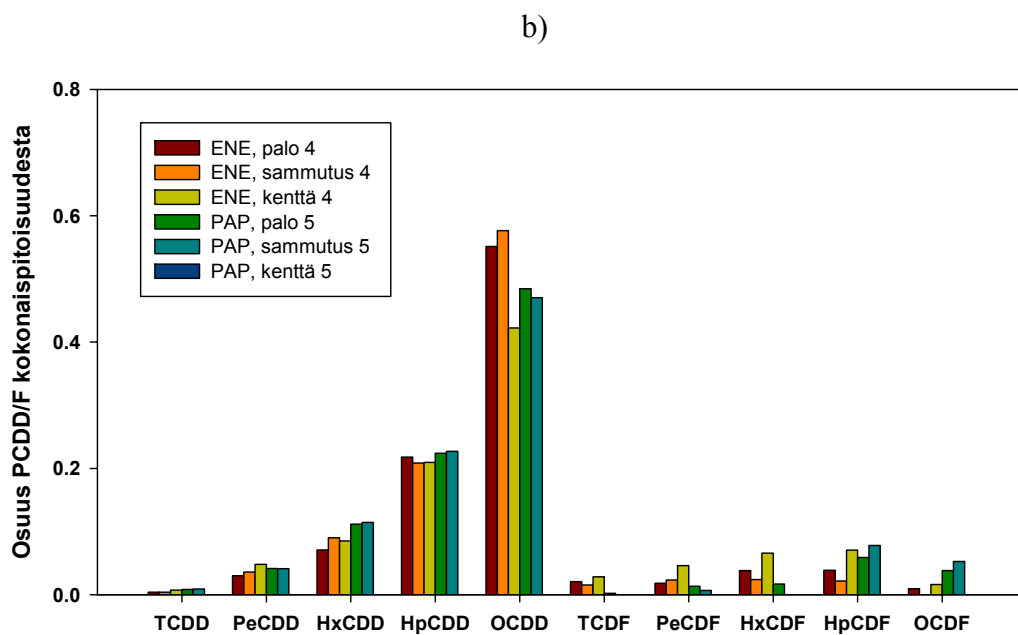
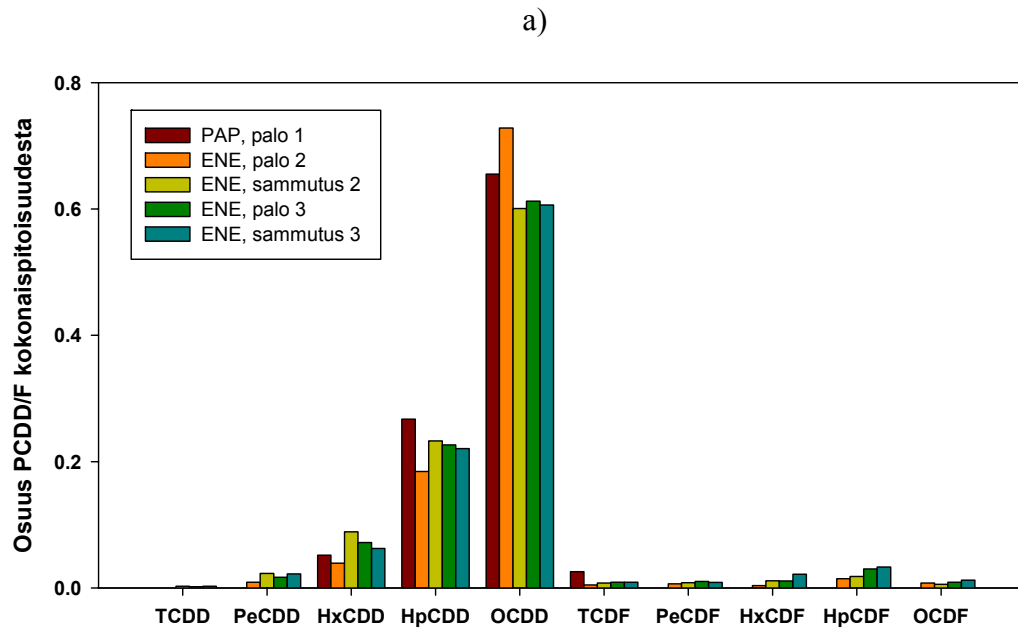
Kuvissa 41c ja 41d on esitetty PCDD/F-kokonaispitoisuudet toksisuusekvivalentteina (TEQ). Pohjoismaisen Nordic-luokituksen mukaan laskettu toksisuusekvivalenttipitoisuus kuution kokeissa vaihteli 4–1 486 pg TEQ/Nm<sup>3</sup> välillä. Kenttäkokeissa pitoisuudet vaihtelivat palon ja sammutuksen aikana 3–103 pg TEQ/Nm<sup>3</sup> välillä. Taustapitoisuus palokentällä ENE-kokeen aikana oli 6 pg TEQ/Nm<sup>3</sup>.



Kuva 41. a) PCDD/F-yhdisteiden pitoisuus kuution kokeissa, b) PCDD/F-yhdisteiden pitoisuus kenttäkokeissa, c) PCDD/F-yhdisteiden pitoisuus toksisuusekvivalentteina (TEQ) kuution kokeissa, d) PCDD/F-yhdisteiden pitoisuus toksisuusekvivalentteina (TEQ) kenttäkokeissa.

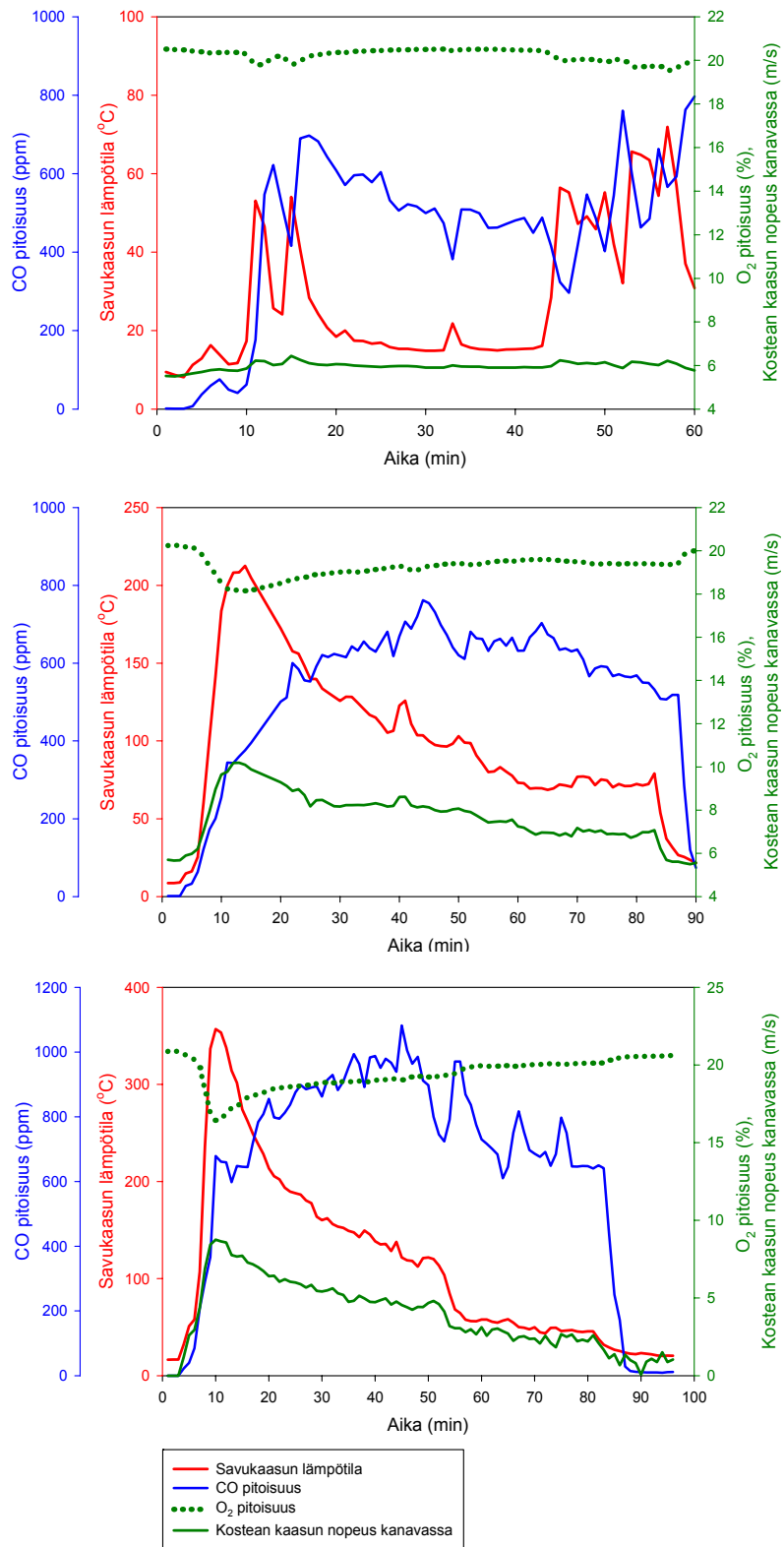
Kokeissa mitattujen PCDD/F-isomeerien suhteelliset osuudet on esitetty kuvissa 42a ja b. Dioksiinien osuus PCDD/F-yhdisteiden kokonaispitoisuudesta oli kuution kokeissa yli 90 % ja kenttäkokeissakin 80–90 %.





Kuva 42. PCDD/F-isomeerien osuudet a) kuution kokeissa, b) kenttäkokeissa.

Kuvassa 43 on esitetty huuvan savukanavasta kokeiden 1–3 aikana mitatut CO- ja O<sub>2</sub>-pitoisuudet, savukaasun lämpötila ja virtausnopeus.



Kuva 43. Savukaasun CO- ja O<sub>2</sub>-pitoisuus, lämpötila ja virtausnopeus kuution kokeissa.

#### 4.2.4.6 Sammutus

Kuution koe 1 jät-paperipaalille hiipui itsestään jo puoli tuntia kestäneen päästömittauksen 1 aikana. Sammuttaminen jaksotettiin alkavaksi tasaminuutein ja päättyväksi aina 3 s kuluttua. Suihkaus toistettiin 15 krt 15 min aikana. Yhdessä suihkauksessa vettä virtasi 2 l. Käytetty vesimäärä testissä oli siten yhteensä 30 l, josta 1 l saatiin kulkeutumaan keräilyaltaan ja poistoputken kautta sammutusjätevesinäytteeksi pulloon. Liekit paperipaalin suihkuputken puoleiselta kyljeltä, sivusta johon suihku osui sekä kuution yläpinnalta sammuivat ensimmäisellä 2 litralla vettä. Palo jatkoi kyttemistään välittömästi pinnan alla ja suihkun kastelemien kohtien ulkopuolella muilla pinnoilla.

Sammutuksen aikaisten päästömittausten jälkeen muut sivut paalista kasteltiin kunnolla toisella suihkuputkella lähietäisyydeltä. Paali nostettiin trukilla alkusammutuslaatalle ja käännettiin sammutetulle kyljelleen tarkkailtavaksi. Paalia jouduttiin kytöjen vuoksi sateisesta säästä huolimatta illalla vielä sammuttelemaan. Paperiin kytämään jääneitä pesäkkeitä raivattiin esiin käsityökaluilla. Hankalimmin sammutettaviksi osoittautuivat alanurkat, joihin palo päivällä oli päässyt pureutumaan syvimmälle.

Kuution kokeissa 2 ja 3 voitiin suorittaa vertailua pelkän veden ja A-vaahdon välillä. Kyseiset kokeet tehtiin energijaakeesta puristetuille samanlaisille paaleille. A-vaahdo suihkutettiin kohteeseen samalla yhdistelmäsuihkuputkella ja muulla välineistöllä kuin pelkkä vesi (kuva 44). Kokeessa 2 liekit energijaepaalin etusivulta ja osittain myös päältä sammuivat ensimmäisellä 2 litralla vettä. Sammutusjätevesinäyte kokeessa 2 otettiin 30 min sammuttamisen jälkeen. Sammuttamiseen oli käytetty vettä tuolloin 60 l. Energiajaepaalit paloivat vielä päästönäytteiden ottamisen jälkeen kolmelta sivulta, joihin kiinteästä telineestä suihkutettu vesi ei kulkeutunut. Sammuttaja suoritti toisella työjohdolla liekkien sammuttamisen loppuun muutamalla kymmenellä litralla vettä. Jälkisammutuksesta saatiin myös sammutusjätevesinäyte.

Koe 2, sammutus vedellä



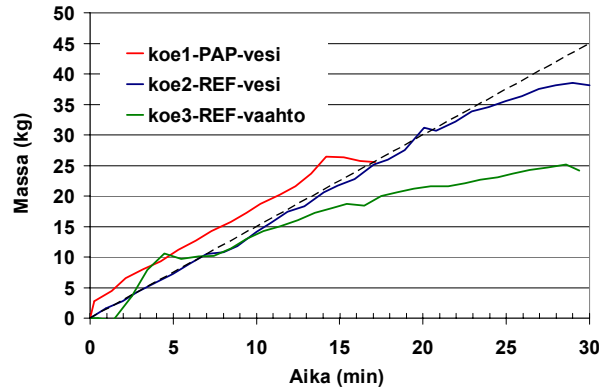
Koe 3, sammutus A-vaahdolla



*Kuva 44. A-vaahdo suihkutettiin kokeessa 3 samoilla yhdistelmäsuihkuputken asennoilla kohteeseensa kuin pelkkä vesi kokeessa 2.*

Kokeessa 3 liekit sammuivat energiajajaepaalin etusivulta alareunaa lukuun ottamatta ensimmäisellä 2 litralla A-vaahdolla. Kokeessa 3 energiajajaepaali paloi sammutuksen aikana voimakkaammin kuin kokeessa 2. Erityisesti paalin oikeanpuoleisella sivulla paalin yläosasta liekit eivät laantuneet A-vaahdon vaikutuksesta. Paalin etusivun alareuna sammui kolmannen suihkauksen jälkeen, kun vaahdo valui alas asti. Sammutusjätevesinäyte kokeesta 3 otettiin keräysaltaan ja putken kautta pulloon, kun aikaa sammuttamisen alkamisesta oli kulunut 22 min. Jälkisammutuksen suorittanut sammuttaja kommentoi välittömästi sammuttamisen jälkeen A-vaahdon sammutuskykyä hyväksi. Sammuttaminen onnistui pienemmällä vesimäärällä, koska vaahdo tunkeutui syvemmälle paalin sisään.

Kuvassa 45 esitetään sammutuksen aikainen, massan mittaukseen perustuva sammutusveden kertyminen vaa'an päällä olleeseen paaliin kokeissa 1–3. Sammutusveden syöttö tapahtui n. 2 l/min nopeudella ja kutakuinkin 75 % tästä määrästä näytti lopulta jääneen paaliin, koska massan eli sammutusveden kertyminen oli mittauksen perusteella n. 1,5 l/min. Häviö johtui pääosin roiskeista ja vähäisissä määrin sammutusveden höyrystymisestä (sammutusveden näytteenottoon päätyi vain muutama litra näytettä). Kuvasta huomataan myös se, kuinka kokeessa 3 palo jatkui voimakkaana energiajajaepaalin toisella sivulla ”vääristäen” kokeen 3 massakäyrää.



Kuva 45. Sammutuksen aikaisen massan mittauksen tulokset. Toteutunut vesivirtaus oli noin 1,5 l/min (katkoviiva).

Paperipaalikasa kokeessa 4 sammutettiin pelkällä vedellä käyttäen yhtä työjohtoa ja suihkuputkea. Sammuttamisen alussa vettä laskettiin hyökkäyssumulla useamman metrin etäisyydeltä 500 l/min (8,33 l/s) virtaamalla. Kuten kuvasta 46 selviää, paperipaalikasa paloi sammuttamisen alkaessa kytemällä pinnaltaan ja liekkiä esiintyi käytännössä vain paalien välisissä saumoissa. Sammutus aloitettiin tuulen yläpuolelta paalikasan päädyistä. Sammuttaja kiersi työsuihkun kanssa ensin myötäpäivään yhden kierroksen kasan ympäri ja näkyvissä olleet pienet liekit saatiin sammumaan ajassa 5 min 19 s sammuttamisen aloittamisesta. Vettä tässä vaiheessa oli käytetty 1 350 l (kuva 47).

a) Sammuttamisen alkaessa



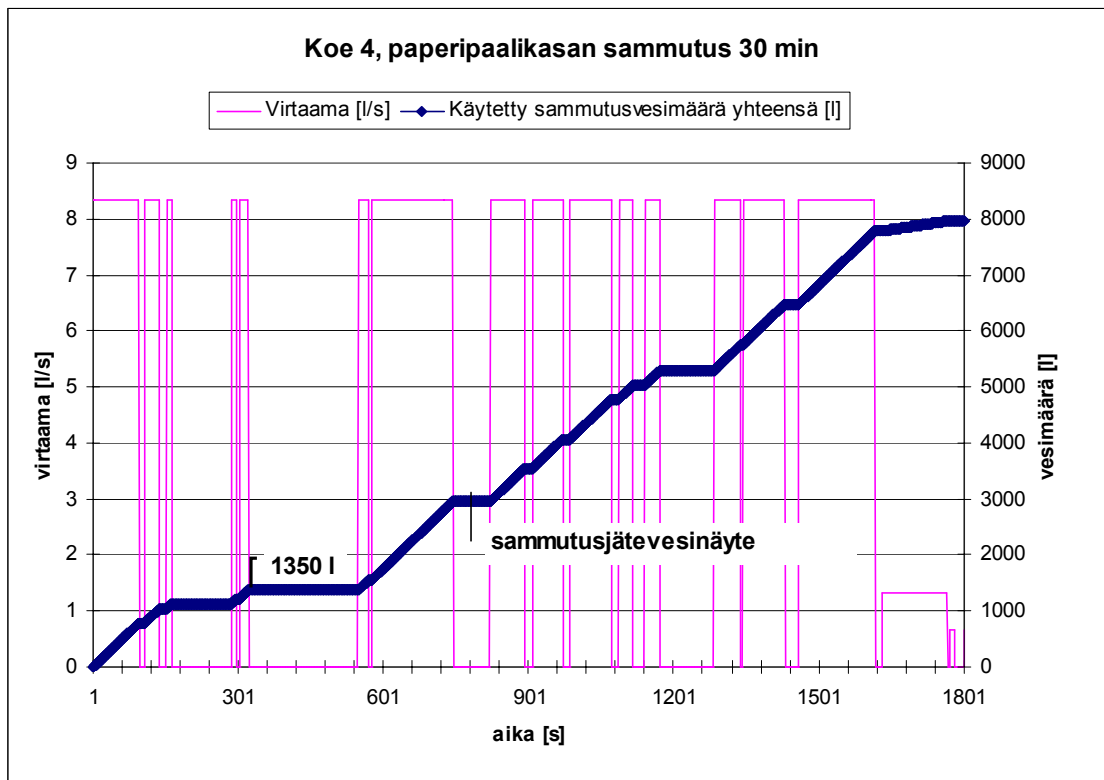
b) 6 min sammuttamisen alkamisesta



Kuva 46. Kokeessa 4 paperipaalikasa paloi kytemällä sammutuksen aikana.

Paperipaalien välissä saumoissa kyteneet palot syttyivät uudelleen ja niitä jouduttiin ”poraamaan” suoralla suihkulla lähietäisyydeltä useaan otteeseen tämän jälkeen. Sammuttaja kiersi työsuihkun kanssa seuraavaksi edeten vastapäivään tuulen alapuolelle. Sammutusjätevedestä saatiin kasan keskeltä edustava tuhkan läpi altaaseen valunut näyte, kun sammuttamisen aloittamisesta oli kulunut 13 min ja sammutusvettä oli käytetty yhteensä 2 950 l (kuva 47). Paperikasaan sitoutunut lämpöenergia ja auringon säteily

mustalle pinnalle höyrystivät sammutusveden pinnalta muutamassa minuutissa. Sammuttaja kiersi työsuihkun kanssa edelleen vastapäivään lähtöpisteeseensä. Ilmapäästämittauksen aikana, välillä 21–27 min sammuttamisen aloittamisesta, toteutettiin vielä kolmas sammutuskerta paalिकासan päältä ylhäältä alaspäin. Paperipaalिकासaa jouduttiin vartioimaan alkusammutuskentällä kolme päivää. Vielä toisena päivänä paaleja sammutettiin koko päivän ajan. Paalit sammuivat lopullisesti vasta, kun ne oli rikottu.



Kuva 47. Paperipaalिकासan sammuttamiseen käytetty sammutusvesivirtaama vasemmallalla ja kokonaissammutusvesimäärä oikealla akselilla ilmapäästämittauksen aikana. Sammutusjätevesinäyte otettiin paalिकासan keskeltä 770 s sammuttamisen aloittamisesta.

Energiajakaosa sammutettiin muiden kokeiden tavoin yhdellä työsuihkulla aloittaen kasan etureunasta. Sammuttamiseen käytettiin pelkkää vettä ilman lisäaineistusta. Energiajakauma oli palanut sammuttamisen alkaessa jo 2 tuntia. Liekit sammuivat penkasta 10 sekunnissa alle 100 litralla vettä (kuva 48).

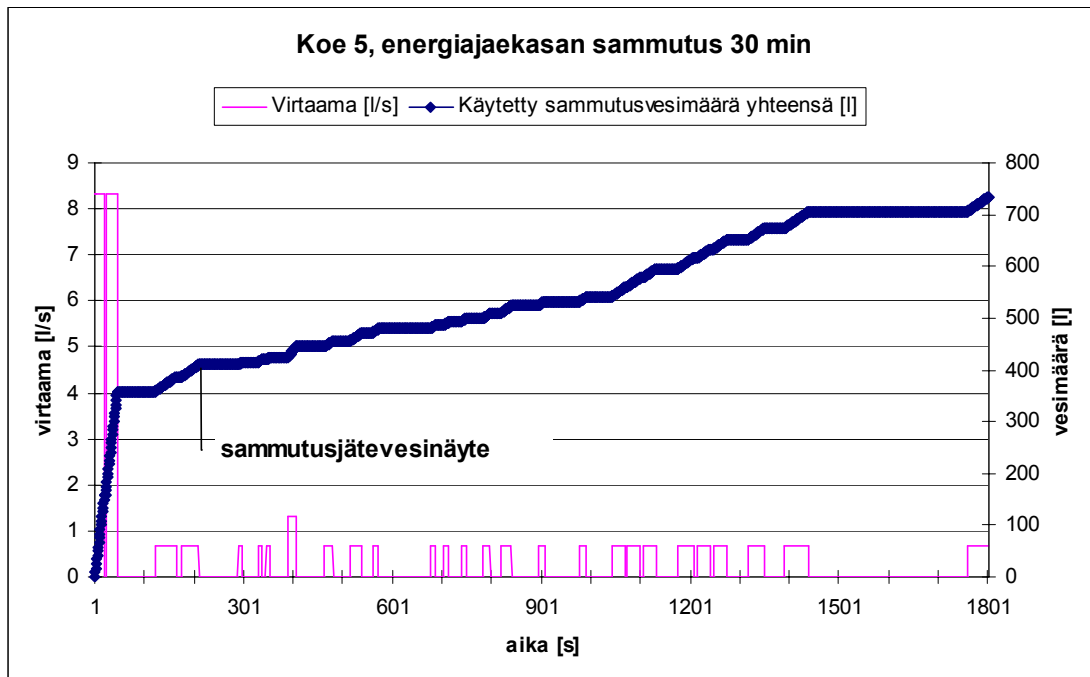
Sammuttamisen alkaessa



10 s sammuttamisen alkamisesta



Kuva 48. Liekit kokeessa 3 energiajakeasan penkasta sammuivat 10 sekunnissa.



Kuva 49. Energiajakeasan sammuttamiseen käytetty sammutusvesivirtaama vasemmalla ja kokonaissammutusvesimäärä oikealla akselilla ilmapäästömittauksen aikana. Sammutusjätevesinäyte otettiin energiajakeauman etureunan sammuttamisen jälkeen keskeltä 210 s sammuttamisen aloittamisesta.

Sammutusvesinäyte otettiin talteen, kun penkan etureuna oli sammutettu 410 litralla vettä. Aikaa sammutuksen aloittamisesta oli tuolloin kulunut 3,5 min. Tämän jälkeen suihkuputkea käytettiin enää tarvittaessa ja vain pienellä virtaamalla, jotta palo ei olisi sammunut kokonaan. Sammutusta jatkettiin kuvassa 48 näkyvältä kohdalta vettä kasan päälle suihkuttelemalla kunnes (ilma-)päästömittaus päättyi. Sammutusvettä käytettiin

30 min aikana yhteensä 740 l (kuva 49). Energiajakeasan pintapalo oli helppo hallita pienelläkin sammutusvesivirtaamalla (kuva 50).



*Kuva 50. Energiajakeasan pintapalo on helppo hallita, mutta syväpalo vaikea sammuttaa.*

Syväpalon kaltaisia onkaloita esiintyi miilupoltossa, koska energiajake toimitettiin paikalle erikokoisiksi puristettuina paaleina. Nämä paalit nostettiin kuormaajalla miiluun, jossa niiden langat instrumentoinnin jälkeen katkottiin. Kasan pinta revittiin koneella löyhemmäksi ja tasattiin lapiolla. Palo jäi kytemään näihin onkaloihin huolellisesti ja runsaalla vedellä ja vaahdolla suoritetusta jälkisammutuksesta eli ns. hukuttamisesta huolimatta. Jälkisammutuksessa käytettiin arviolta useita kymmeniä tuhansia litroja vettä ja 20 l vaahtonestettä. Lopullisesti energiajakeasa sammui vasta kolmantena päivänä polttokokeesta kauhakuormaajalla suoritettujen sammutusraivauksen jälkeen.

Johtopäätöksiä sammutuskokeista tehtäessä tulee huomioida, että kyseessä ovat yksittäiset kokeet tietyille paperi- ja jätejakeille. Sammutusvaikutuksesta ja vesimäärästä saatiin näissä kokeissa vain suuntaa antavia arvoja, joiden yleistämiseksi tulisi tehdä huomattavasti suurempi joukko kokeita lähtöarvoja muunnellen. Näyttäisi kuitenkin siltä, että näiden kokeiden perusteella sammutusvoimien resursoimisessa voisi soveltaa seuraavia ohjeellisia nyrkkisääntöjä:



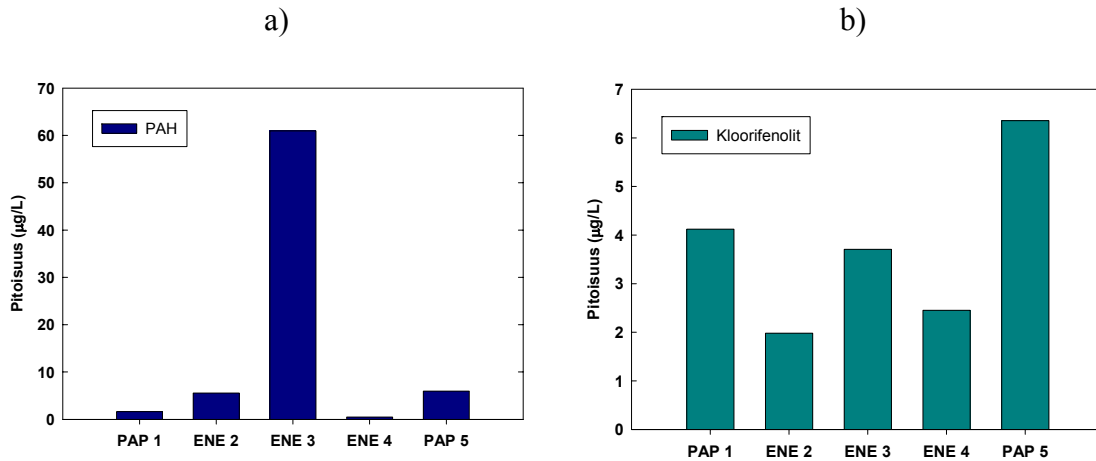
1. Sammuttaessa on käytettävä paineilmalaitetta.
2. Yhdellä työjohdolla pystyy saamaan 20 paperipaalin palon hallintaan 5 minuutissa.
3. Jätekeskusten sammutuksessa tulee varautua koneelliseen sammutusraivaukseen.
4. Jälkisammutukseen kuluu päiviä ja paljon vettä.
5. Sammutusvettä tulee varata vähintään sama määrä kuin on palavaa materiaalia.
6. Jäteuman pintapalon hallintaan riittää 1 l/min/m<sup>2</sup>:n keskimääräinen jatkuva sammutusvesivirtaama, mutta syväpalon sammutus on vaikeaa.
7. Syväpalon sammuttaminen nopeutuu, jos veteen lisätään pintajännitystä pienentävää lisäainetta.

#### 4.2.4.7 Sammutusjätevedet

Suuren mittakaavan kokeiden sammutusjätevesistä analysoidut PAH-yhdisteiden ja kloorifinoliinien pitoisuudet on esitetty kuvissa 51a ja b. Sammutusvesinäytteistä ei löydetty tässä tutkimuksessa analysoituja klooribentseeniä, PCB-yhdisteitä, dioksiineja eikä furaaneita.

Sammutusjätevesinäytteissä PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuudet vaihtelivat 0,5–5,9 µg/L, kun sammutusvetenä käytettiin pelkkää järvivettä. Kokeessa 3 (ENE 3) sammutusveteen oli lisätty lisäainetta. Tässä kokeessa jätevesinäytteen PAH-pitoisuus oli selkeästi suurempi (61 µg/L) tavalliseen sammutusveteen verrattuna (Kuva 51a). Analysoiduista PAH-yhdisteistä näytteissä havaittiin vain 2–3 bentseenirengasta sisältäviä yhdisteitä (naftaleenistä fluoranteeniin olevat yhdisteet).

Kloorifenoliinien osalta sammutusjätevesinäytteissä ei suuria eroavaisuuksia havaittu. Kokonaispitoisuudet vaihtelivat 2,0–6,4 µg/L välillä (Kuva 51b).



Kuva 51. a) PAH-yhdisteiden pitoisuudet sammutusvesinäytteissä, b) kloorifenoleiden pitoisuudet sammutusvesinäytteissä.

### 4.3 Tulosten vertailu kirjallisuuteen

#### 4.3.1 Savukaasupäästöt

Kartiokalorimetrikokeissa polttomateriaalin palaminen saatiin aikaan lämpösäteilyn avulla. Voimakas lämpösäteily aiheuttaa polttoaineen pinnalla termodesorption, jolloin polttoaineen pyrolyysituotteet vapautuvat kiinteästä olomuodosta kaasumaiseen olomuotoon. Voimakkaan pyrolyysin vuoksi pyrolyysikaasut palavat polttoainehiukkasten ympärillä eikä liekki välttämättä koske lainkaan itse palavaan materiaaliin. Suuren mittakaavan kenttäkokeissa palomekanismi on taas ollut erilainen. Kenttäkokeissa palamisessa on ollut mukana myös ns. jäännöshiilipalaminen. Jäännöshiilen palamisessa on kyse reagoivien molekyylien, kuten hapen, diffuusiosta huokoisen polttoaineen pintaan ja sisäpuolelle sekä niiden välisistä heterogeenisistä reaktioista. Mekanismi eroaa suuresti pyrolyysistä, jossa ajavana voimana toimii lämmönsiirto ympäristöstä materiaaliin. Erilainen palomekanismi vaikuttaa osaltaan pienen ja suuren mittakaavan kokeiden päästöjen erilaisuuteen, kuten siihen, miksi kartiokalorimetrikokeissa ei havaittu PCDD/F-yhdisteitä kierrätyspaperin eikä energijakeen polttokokeissa. Toinen päästöjen erilaisuuteen vaikuttava tekijä ovat poltetun materiaalin määrät, jotka olivat kenttäkokeissa paljon suuremmat kuin kartiokalorimetrikokeissa.

Suuren mittakaavan kokeissa kuution kokeiden (kokeet 1–3) pitoisuudet olivat noin 10–100 kertaa suuremmat kuin energijajaeuman (koe 4) ja paperipaalिकासan (koe 5) palamisen aikana mitatut pitoisuudet. Tämä johtuu mittausten erilaisesta näytteenotto-geometriasta. Energijajaeuman (koe 4) ja paperipaalिकासan (koe 5) polttokokeissa mitattuihin pitoisuuksiin ovat vaikuttaneet savukaasun voimakas laimeneminen ja tuulen suunta. Tuulen suunnalla on ollut merkitystä siihen, onko savuvana näytteenottohetkellä osunut keräi-

meen vai ei. Kuution kokeissa (kokeet 1–3) vastaavasti näytekaasun laimeneminen ja leviäminen on ollut paljon vähäisempää. Sama pätee myös pienen mittakaavan ja suuren mittakaavan pitoisuustulosten keskinäisessä vertailussa.

Suuren mittakaavan kokeissa tutkittiin myös sammutuksen vaikutusta päästöihin. Palon sammutuksen aikana palo-olosuhteet muuttuvat epäsuotuisemmiksi ja tällöin myös epätäydellisen palamisen päästöt voivat kasvaa. Sammutuksen aikana vesisuihku myös irrottaa palanutta jättemateriaalia, joka voi kulkeutua pieninä hiukkasina savukaasuvanan mukana ympäristöön. Kokeissa sammutuksen aikaiset päästöt olivat yleensä hieman (noin 0,5–5 kertaa) suuremmat kuin palon aikaiset.

Kaatopaikkapalon aikana ilman PAH-pitoisuudeksi (14 PAH-yhdistettä) on mitattu 0,81–1,67  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Ruokojärvi et al., 1995b). Tämän tutkimuksen suuren mittakaavan kenttäkokeissa energijakeen ja kierrätyspaperin PAH-päästöt (16 PAH-yhdistettä) olivat selvästi suuremmat, 22–95  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ . Samassa Ruokojärvi et al. (1995b) tutkimuksessa raportoitiin teollisuuskaatopaikkapalon (sisältänyt siistausjätettä) aikana PCB-yhdisteiden pitoisuudeksi 11–590  $\text{ng}/\text{m}^3$ . Tämä vastaa hyvin suuren mittakaavan kierrätyspaperin polttokokeen päästöjä (355–484  $\text{ng}/\text{Nm}^3$ ). Suuren mittakaavan kokeissa PCB:n lähteeksi arvioitiin itsejäljentävää paperia, joka olisi joutunut kyseisen kierrätyspaperin joukkoon esimerkiksi vanhojen arkistopapereiden hävityksen yhteydessä.

Sosiaali- ja terveysministeriö on määritellyt ohjearvot työntekijöiden hengitysilman epäpuhtauksille, jotka voivat aiheuttaa haittaa tai vaaraa työntekijöiden turvallisuudelle (HTP-arvot 2007). Kahdeksan tunnin HTP-arvo on määritelty mm. naftaleenille (5  $\text{mg}/\text{m}^3$ ), bentso(a)pyreenille (0,01  $\text{mg}/\text{m}^3$ ), klooribentseenille (23  $\text{mg}/\text{m}^3$ ), 1,2-diklooribentseenille (61  $\text{mg}/\text{m}^3$ ), 1,4-diklooribentseenille (120  $\text{mg}/\text{m}^3$ ), 1,2,3-triklooribentseenille (38  $\text{mg}/\text{m}^3$ ), 1,2,4-triklooribentseenille (15  $\text{mg}/\text{m}^3$ ), 1,3,5-triklooribentseenille (38  $\text{mg}/\text{m}^3$ ), tetrakloorifenolille (0,5  $\text{mg}/\text{m}^3$ ), pentakloorifenolille (0,5  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) ja PCB:lle (0,5  $\text{mg}/\text{m}^3$ ), mutta ei esimerkiksi PCDD/F-yhdisteille. Näihin ohjearvoihin verrattuna pitoisuudet palopaikan läheisyydessä palokentällä tehdyssä polttokokeissa olivat pieniä.

Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto ovat asettaneet kiinteää yhdyskuntajätettä polttaville laitoksille savukaasujen dioksiini- ja furaanipäästöille raja-arvon 0,1  $\text{ng TEQ}/\text{Nm}^3$  (2000/76/EY). Raja-arvoon nähden näissä kokeissa saadut päästöt ovat korkeat. SER-murskan polttokokeessa PCDD/F-päästö oli 3,4  $\text{ng TEQ}/\text{Nm}^3$ . Suuren mittakaavan polttokokeissa energijakeen päästö vaihteli 0,1–1,5  $\text{ng TEQ}/\text{Nm}^3$  välillä. Kierrätyspaperin PCDD/F-päästö oli vain noin 0,01  $\text{ng TEQ}/\text{Nm}^3$ .

Suomessa lähellä kaatopaikkapalaa PCDD/F-pitoisuudeksi on mitattu 51–427  $\text{pg TEQ}/\text{Nm}^3$  (Ruokojärvi et al. 1995a). Myös tämän tutkimuksen suuren mittakaavan energijakeen polttokokeissa palokentällä muutaman metrin päästä itse tulipalosta kerättyjen savukaasu-

näytteiden pitoisuudet olivat samaa suuruusluokkaa (95–103 pg TEQ/Nm<sup>3</sup>). Hengitysilmasta saadun PCDD/F-yhdisteiden hyväksyttäväksi päiväsaannoksi (ADI) on ehdotettu arvoa 5 pg TEQ/kg (Ahlborg et al. 1988). Esimerkiksi 80 kg painavan ihmisen, joka hengittää 20 l/min ja työskentelee 8 tuntia päivässä kentällä, jossa PCDD/F-pitoisuudet vaihtelisivat 10–100 pg TEQ/Nm<sup>3</sup> välillä, teoreettinen päivittäinen saanto hengitysteiden kautta olisi noin 1–12 pg TEQ/kg. Saanto voi olla huomattavasti suurempikin ottaen huomioon, että ihmisen hengitystilavuus vaihtelee noin 10–100 l/min riippuen fyysisen rasituksen tasosta.

### 4.3.2 Sammutusjätevedet

Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa (STM 461/2000) sanotaan talousveden laatuvaatimuksista, ettei PAH-yhdisteiden (benzo[b]fluoranteeni, benzo[k]fluoranteeni, indeno[1,2,3-cd]pyreeni ja benzo[g,h,i]peryleeni) pitoisuus saisi ylittää arvoa 0,1 µg/L ja bentso(a)pyreenin 0,01 µg/L. Kokeiden sammutusjätevesinäytteissä ei havaittu kyseisiä STM:n määrittelemiä PAH-yhdisteitä. Sammutusjätevesinäytteiden PAH-pitoisuudet (0,5–61 µg/L) olivat selvästi suurempia kuin STM:n raja-arvo 0,1 µg/L. Vertailussa täytyy ottaa huomioon se, että sammutusvesinäytteen kokonaispitoisuus koostui eri yhdisteistä (naftaleeni, asenaftyleeni, asenafteeni, fluoreeni, fenantreeni, antraseeni ja fluoranteeni) kuin STM:n raja-arvossa. Ruotsissa tehdyssä yhdyskuntajätteen polttokokeessa Lönnemark et al. (2008) mittasivat sammutusjätevedestä 31–48 µg/L:n PAH-pitoisuuksia. Näissäkin ruotsalaisten kokeissa PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuus koostui lähinnä samoista yhdisteistä, joita havaittiin suuren mittakaavan sammutusjätevesistä.

Suuren mittakaavan kuution kokeissa tutkittiin, miten sammutusveteen lisätty lisäaine (A-vaahdo) vaikutti energiajakeen polttokokeen sammutusjätevesipäästöihin. Kokeessa havaittiin A-vaahdon lisäävän sammutusjäteveden PAH-pitoisuuden noin 10-kertaiseksi tavalliseen sammutusveteen verrattuna. Yleensä PAH-yhdisteet ovat heikosti vesiliukoisia ja pyrkivät vedessä kiinnittymään johonkin orgaaniseen ainekseen. Sammutusveteen lisätty lisäaine on voinut estää PAH-yhdisteen sitoutumista orgaaniseen ainekseen tai lisätä suoraan sen liukenevuutta sammutusjätevedeen sammutetusta jättemateriaalista. Tämä voi osaltaan selittää sammutusjätevesinäytteissä havaitun eron tavallisen järveden ja lisätyn lisäaineen välillä.

Kloorifenolien kokonaispitoisuudelle talousvedessä on annettu raja-arvo 10 µg/L (STM 461/2000). Sammutusjätevesinäytteissä kloorifenolien kokonaispitoisuudet olivat pieniä eivätkä ylittäneet STM:n raja-arvoa. Sammutusjäteveden kloorifenolipitoisuuksiin A-vaahdon käytöllä ei ollut juurikaan merkitystä. Puhtaina yhdisteinä kloorifenolit ovat yleensä veteen niukkaliukoisia, etenkin happamissa olosuhteissa. Sammutusveteen kloorifenolit tulevat lähinnä savukaasusta vesipisaran mukana absorptio- tai adsorption seurauksena. Sammutusvesi myös alentaa palolämpötilaa, jolloin kloorifenolien muodostuminen savukaasussa estyy.

## 5. Jätteiden palamisen aiheuttamien riskien laskennallinen arviointi

### 5.1 Päästöjen kulkeutumisen laskentaan käytetyn ohjelman kuvaus

Tässä työssä päästöjen kulkeutumista ilmassa on tarkasteltu Yhdysvaltalaisen NIST:n (National Institute of Standards and Technology) kehittämällä ALOFT-ohjelmalla<sup>2</sup> (A Large Outdoor Fire plume Trajectory model). Malli laskee lähtötietojen ja virtausyhtälöiden avulla tulipalosta syntyvän savupilven etenemistä pysty- ja poikkisuunnaisesti tuulen suunnassa (McGrattan et al. 1997). Laskennan lähtötietoja annetaan taulukon 13 parametreille, joita ovat mm. palon määrittely (koko ja paloteho), eri yhdisteiden päästökertoimet, tuulen nopeus jne.

ALOFT-ohjelman tuloksia voidaan tarkastella graafisesti savupilven pysty- tai vaakaleikkauksina, joissa päästöjen pitoisuudet esitetään halutuilla väriasteikoilla (kuva 52). Tulokset on myös saatavilla numeroina erillisistä tulostiedostoista, jollaista tapaa tässä työssä on käytetty. Savupilven päästöjen pitoisuudet (esim.  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) lasketaan ohjelmassa yhden tunnin aikakeskiarvona. Ohjelman laskentatarkkuus riippuu pitkälti syötetietojen laadusta, joista oleellimmat ovat lähdetermin määrittäminen (palo ja päästöt) ja meteorologiset parametrit: tuulen nopeus ja lämpötilan muuttuminen korkeussuunnassa (*lapse rate*).

Päästöjen kulkeutumista tuulen suuntaan on tarkasteltu tässä työssä 20 km:n etäisyydelle palosta (maksimietäisyys ALOFT-ohjelmassa). Poikkisuunnassa laskenta-alue ulottuu  $\pm 1,5$  km palon keskilinjalta. Pystysuunnassa laskenta-alueen korkeus vaihtelee sadoista metreistä kilometriin. Laskenta-alueen yhden hilakopin dimensiot pituus ja poikkisuuntaan ovat karkeasti arvioiden noin 50 m ja pystysuunnassa noin 20–50 m.

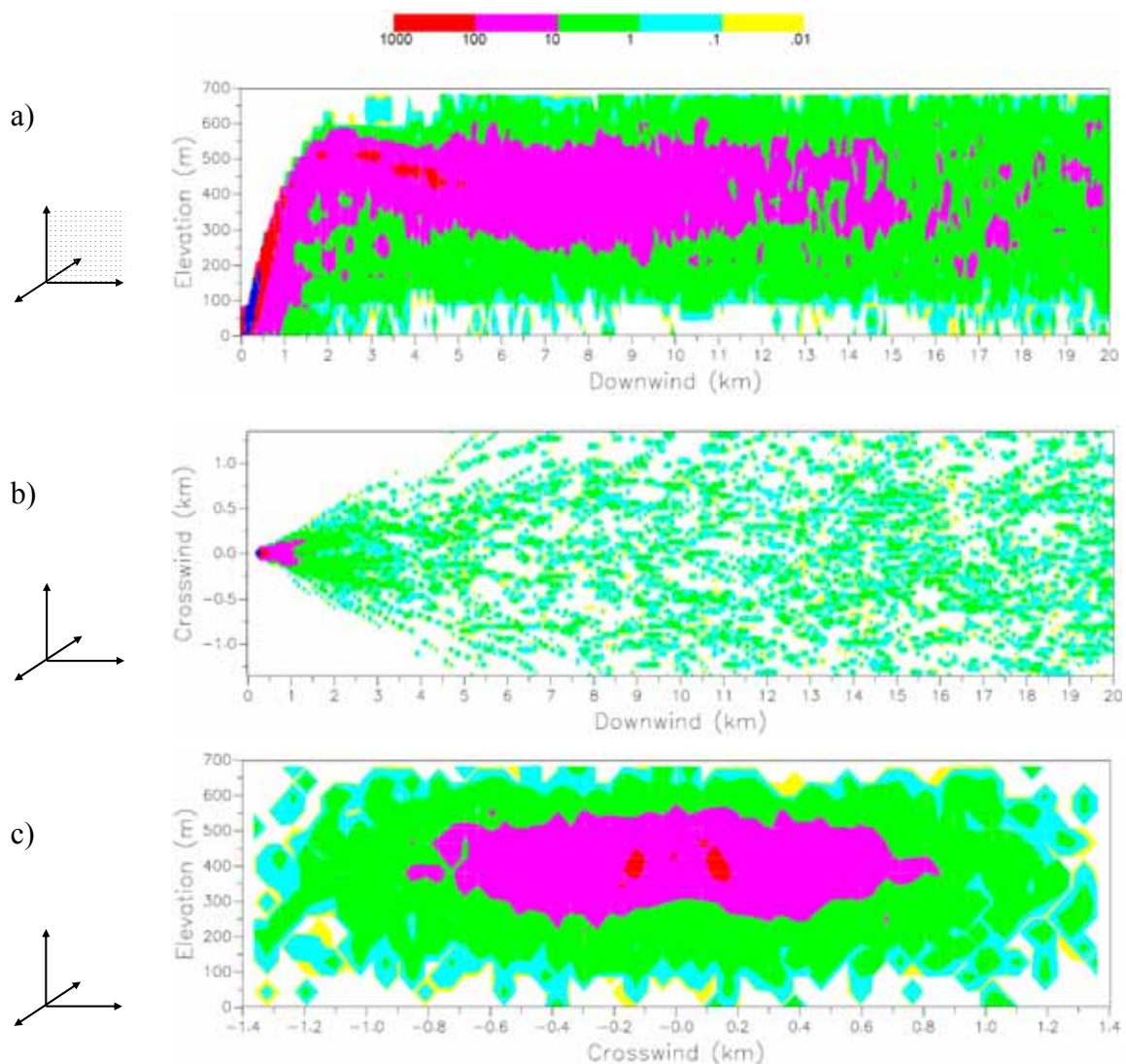
---

<sup>2</sup> ALOFT-ohjelman kotisivut: <http://www.fire.nist.gov/aloft/>

Taulukko 13. Päästöjen kulkeutumisen mallinnuksessa käytetyn ALOFT-ohjelman syöteparametrit (Hietaniemi ja Rinne 2005).

parametri	yksikkö	kommentti
<i>Laskenta-alueen ja ilmakehän ominaisuuksien määrittely</i>		
Downwind distance	km	Päästöjen pitoisuuksien laskenta-alueen pituus (etäisyys palosta tuulen suuntaan)
Wind speed <sup>1)</sup> u	m/s	Päästöjen pystysuuntaisella hajonta-alueella vaikuttava keskimääräinen tuulennopeus. Sallitut arvot: 2 m/s–15 m/s.
Surface wind speed <sup>1)</sup> u <sub>s</sub>	m/s	Maanpinnalla vaikuttavan tuulen nopeus. Sallitut arvot: 1 m/s–7,5 m/s.
Lateral Wind Standard Deviation Over Land $\sigma_y$ & Vertical Wind Standard Deviation Over Land $\sigma_z$	m/s	Määräytyvät seuraavien ilmakehän stabiilisuutta kuvaavien Pasquill-Gifford -kategorioiden mukaan: A–B (erittäin – kohtuullisen epästabiili): $\sigma_y = 23^\circ$ , $\sigma_z = 14^\circ$ B (kohtuullisen epästabiili): $\sigma_y = 20^\circ$ , $\sigma_z = 12^\circ$ B–C (kohtuullisen – hieman epästabiili): $\sigma_y = 18^\circ$ , $\sigma_z = 11^\circ$ C (hieman epästabiili): $\sigma_y = 15^\circ$ , $\sigma_z = 10^\circ$ C–D (hieman epästabiili – neutraali): $\sigma_y = 13^\circ$ , $\sigma_z = 8^\circ$ D (neutraali): $\sigma_y = 10^\circ$ , $\sigma_z = 6^\circ$ E (hieman stabiili): $\sigma_y = 5^\circ$ , $\sigma_z = 3^\circ$ F (kohtuullisen stabiili): $\sigma_y = 2.5^\circ$ , $\sigma_z = 2^\circ$ Sallitut arvot: 2°–7°.
Lapse rate	°C/km	Määrittelee, kuinka lämpötila alenee korkeuden kasvaessa. Voidaan valita ilmakehän stabiilisuuden ALOFT™-ohjelman valikosta.
Surface temperature	°C	Lämpötila maan pinnalla.
<i>Palon ja päästöjen määrittely</i>		
Fire area	m <sup>2</sup>	Ympyrän muotoisiksi oletetun palon palava pinta-ala. Sallitut arvot: 25 m <sup>2</sup> –1 000 m <sup>2</sup> . Yli 1 000 m <sup>2</sup> palo voidaan toteuttaa määrittelemällä useita vierekkäisiä paloja.
Heat release rate per unit area, HRR <sup>''</sup>	MW/m <sup>2</sup>	Paloteho päästöjä tuottavan pinnan yksikköpinta-alaa kohden. Päästöjä tuottavana pinta-alana allaspalossa palava pinta-ala ja rakennuspalossa aukot, josta savukaasut purkautuvat ulos. Sallitut arvot: 0 MW/m <sup>2</sup> –5 MW/m <sup>2</sup> .
Radiative fraction $\gamma_r$	-	Säteilemällä kuljettava osuus palotehosta HRR <sup>''</sup> .
Burning rate per unit area, BR <sup>''</sup>		Tulipalossa kuluvan massan muutosnopeus päästöjä tuottavan pinnan yksikköpinta-alaa kohden. Päästöjä tuottavana pinta-alana allaspalossa palava pinta-ala ja rakennuspalossa aukot, josta savukaasut purkautuvat ulos. Suureita HRR <sup>''</sup> ja BR <sup>''</sup> yhdistää tehollinen lämpöarvo ECH = HRR <sup>''</sup> /BR <sup>''</sup> (MJ/kg). Sallitut arvot: 0 kgs <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> – 1 kgs <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> .
PM10	g/kg	< 10 µm suuruisten hiukkasten osuus.
PM2.5	g/kg	< 2,5 µm suuruisten hiukkasten osuus.
CO <sub>2</sub>	g/kg	Palavan aineen CO <sub>2</sub> -tuotto.
CO	g/kg	Palavan aineen CO-tuotto.
SO <sub>2</sub>	g/kg	Palavan aineen SO <sub>2</sub> -tuotto.
VOC	g/kg	Palavan aineen VOC-tuotto (VOC = volatile organic compounds, eli haihtuvat orgaaniset yhdisteet)
User defined emission factors (3 kpl)	käyttäjän voi valita	Käyttäjä voi valita kolme päästökompontenttia. Tulokuvien tulkinta riippuu valituista yksiköistä. Jos käyttäjä valitsee yksiköksi g/kg, ALOFT™:n laskemat päästöt ovat yksiköissä µg/m <sup>3</sup> . Jos tuottoyksikkö on mg/kg, päästöjen pitoisuuden yksikkö on ng/m <sup>3</sup> ja jos tuotto ilmaistaan yksiköissä µg/kg, pitoisuuden yksikkö on pg/m <sup>3</sup> .

1) Syöteenä annetaan vain toinen tuulen nopeuden määrittelevistä parametreista.



Kuva 52. Esimerkki ALOFT-ohjelman ennustamasta savupilven leviämisestä. Kuvissa leikkaustasot a) pysty-, b) vaaka- ja c) sivusuunnassa.

## 5.2 Päästöjen kulkeutumisen mallinnus

Raportin alussa esitettyjen tulipalotapausten osalta havaittiin, että monissa niistä palo oli levittäytynyt varsin laajalle pinta-alalle palaen siinä pitkään. Päästöjen kulkeutumisen mallinnuksella haluttiin selvittää, miten suuria haittoja ympäristöön aiheutuu palosta leviävän savupilven vaikutuksesta. Mallinnuksessa keskityttiin nimenomaan haitallisiin yhdisteisiin, tarkemmin ottaen niihin päästöihin, joita pienen mittakaavan kokeissa saatiin määritettyä. On muistettava, että savukaasuissa esiintyy myös monia muita yhdisteitä esim. CO, typenoksidit ja pienhiukkaset, joilla osalla on myös akuutisti vaikuttavia ominaisuuksia. Tässä työssä ei kuitenkaan käsitellä näitä yhdisteitä.

Mallinnuksessa tarkastellaan erikokoisten palojen (100–6 000 m<sup>2</sup>) ja tuulen vaikutusta (1 m/s tai 5 m/s) savupilven leviämiseen ja pitoisuuksiin.

Taulukossa 14 esitetään tämän tutkimuksen päästöjen kulkeutumisen mallinnuksessa käytettyjä lähtöarvoja. Kunkin jätejakeen paloteho ja palamisnopeus on ilmoitettu keskimääräisenä arvona kartiokalorimetrikokeiden tulosten pohjalta (keskiarvo 300 s palamisen ajalta). Päästöjen vapautumiseen liittyvät päästökertoimet  $Y_m$  on esitetty aiemmin taulukossa 11. Päästökertoimiin on laskettu yhteen sekä hiukkas- että kaasufaasissa esiintyvät yhdisteet.

*Taulukko 14. ALOFT-ohjelman syöteparametrien arvot päästöjen kulkeutumisen laskennassa. Päästökertoimet esitetty aiemmin taulukossa 11.*

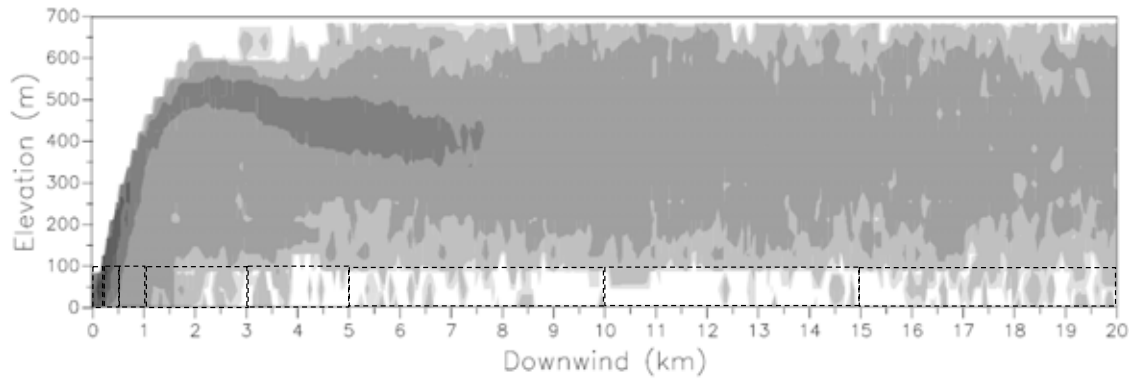
Jätejake	Palamisnopeus (kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	Paloteho (MW·m <sup>-2</sup> ) <sup>a</sup>	Tuulen nopeus (m/s) ja Pasquill-Gifford -stabiilisuuskategoria	Lapse rate (°C/km)
ENE	0.0101	0.185	1.0 ja B 5.0 ja C-D	0
PAP	0.0057	0.048		
PET	0.0197	0.289		
REN	0.0066	0.180		
SER	0.0059	0.121		
YHD	0.0091	0.154		

<sup>a</sup> palavana pinta-alana on käytetty 100 m<sup>2</sup>, 1 000 m<sup>2</sup>, 3 000 m<sup>2</sup> ja 6 000 m<sup>2</sup>.

### 5.3 Tulokset päästöjen kulkeutumiselle

Seuraavassa esitetään tulokset päästöjen kulkeutumiselle. Tuloksia (kuvat 54–58) esitetäessä tarkastellaan vain sitä osaa savupilvestä, tässä tapauksessa maanpinnasta 100 m:n korkeuteen yltävä vyöhyke, joka mahdollisesti aiheuttaisi altistusta ihmisille. Savupilven pituussuuntainen akseli on vielä jaettu eri etäisyyksien mukaan useaan ”laatikkoon” (ks. kuva 53), jonka sisältämä pitoisuus esitetään yhtenä lukuna – keskiarvona yli koko ”laatikon”.





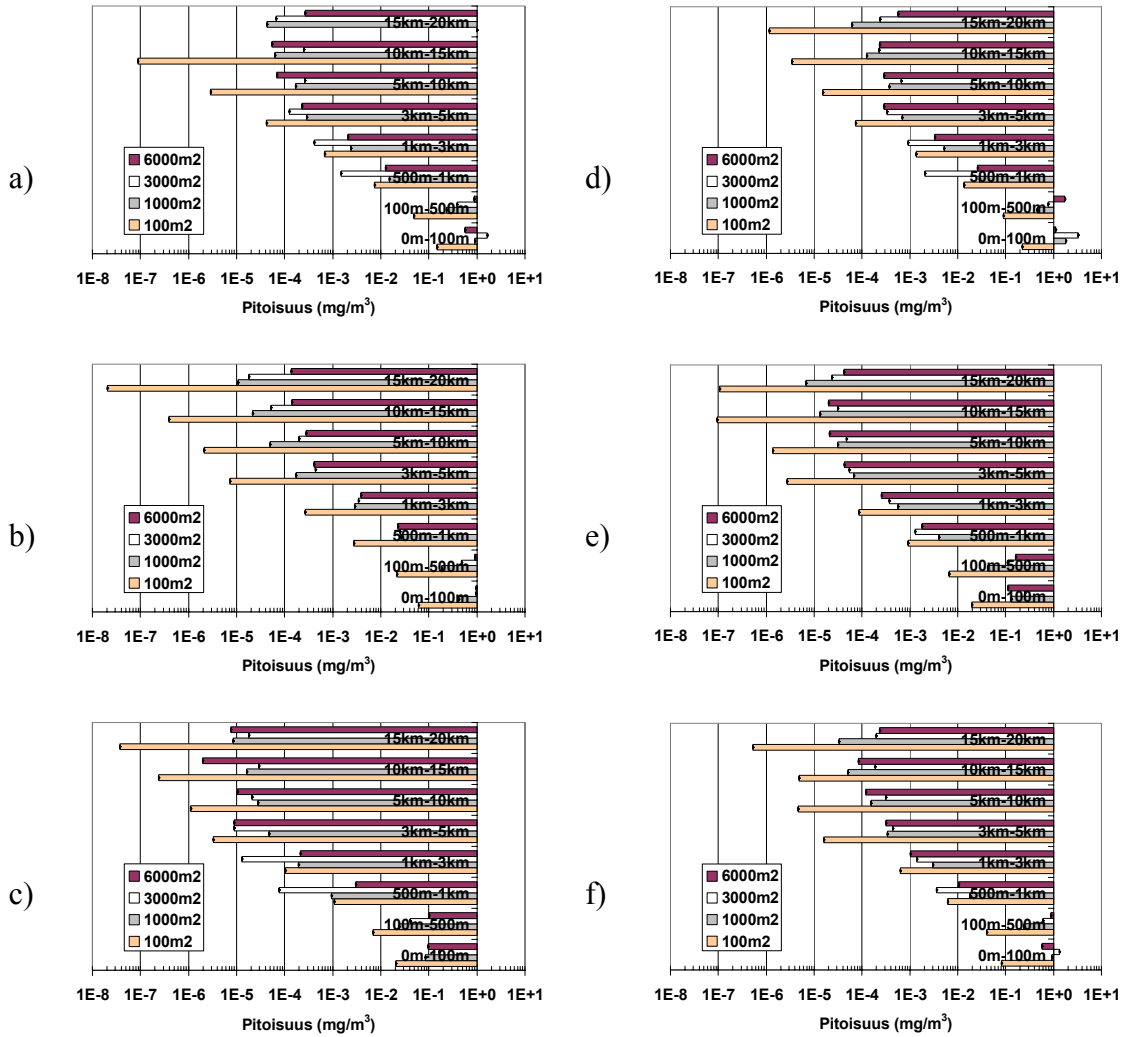
*Kuva 53. Tulipalosta syntyvän savupilven leviäminen tuulen suuntaan. Katkoviivoin piirretyillä laatikoilla on hahmotettu jatkossa nähtävien tulosten esittämistapa eri etäisyyksiltä. Tuloksissa (kuvat 54–58) esitetään kunkin laatikon sisälle jäävän pitoisuuden keskiarvo ja 95 %:n luottamusvälit.*

Kuvissa 54 ja 55 esitetään PAH-yhdisteiden pitoisuudet tarkastellulla 0–100 m:n pystysuuntaisella vyöhykkeellä, kun tuulen nopeus lähellä maanpintaa on 5 m/s (kuva 54) tai 1 m/s (kuva 55). Olennaisin ero kuvien 54 ja 55 tuloksissa nähdään tuulen vaikutuksessa, jossa nopeudella 5 m/s puhaltava tuuli aiheuttaa sen, ettei savupilvi nouse niin korkealle kuin tapauksessa 1 m/s. Tämä johtaa siihen, että savupilven aiheuttamat pitoisuudet ovat korkeammat tapauksessa 5 m/s. Ero on selvä varsinkin pinta-alaltaan 3 000 m<sup>2</sup>:n ja 6 000 m<sup>2</sup>:n paloissa, joiden paloista syntyvä kuuma ja korkealle nouseva nostevirtaus ei 1 m/s tuulen tapauksessa aiheuttaisi, laskentatarkkuuden puitteissa, altistavia pitoisuuksia tarkastellulla vyöhykkeellä.

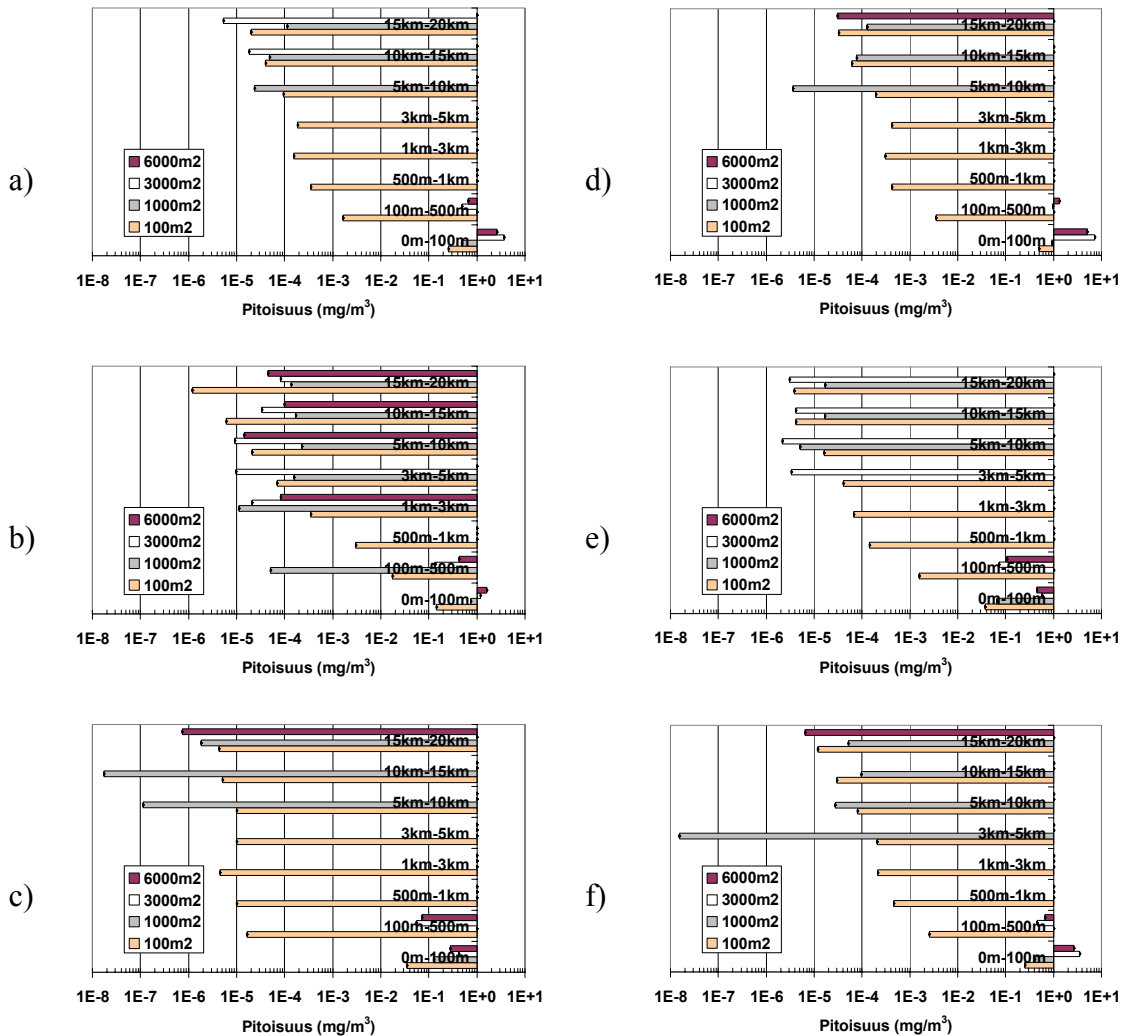
Edellisestä poiketen pinta-alaltaan pienimmän (100 m<sup>2</sup>) tulipalon tapauksessa heikomman nostevirtauksen vuoksi matalammalle jäävä savupilvi aiheuttaa suuremman pitoisuuden tuulen nopeuden ollessa 1 m/s kuin tuulen nopeudella 5 m/s, jolloin savupilvi hajoaa enemmän.

Tarkasteltaessa pinta-alaltaan yli 1 000 m<sup>2</sup>:n paloja voidaan yleisesti ottaen sanoa PAH-pitoisuuksien olevan 0–500 m:n päässä<sup>3</sup> palosta n. 0,1 ... 1 mg/m<sup>3</sup> välillä. Etäisyyden kasvaessa pitoisuudet laimenevat ja erot tasoittuvat n. 10<sup>-5</sup> ... 10<sup>-3</sup> mg/m<sup>3</sup> välille. Pinta-alaltaan pienimmän (100 m<sup>2</sup>) palon tapauksessa pitoisuudet ovat noin 100–1 000 kertaa pienempiä kuin edellä esitetyt pitoisuudet. Suuren mittakaavan kenttäkokeissa mitatut päästöt olivat suurimmillaan luokkaa 10<sup>-1</sup> mg/Nm<sup>3</sup>, joten laskettujen ja mitattujen päästöjen välillä on hyvä vastaavuus.

<sup>3</sup> Laskentateknisistä syistä palojen pinta-alat 3 000 m<sup>2</sup> ja 6 000 m<sup>2</sup> tapauksissa on muodostettu pinta-alaltaan 1000 m<sup>2</sup>:n ympyränmuotoisista tulipaloista asettamalla niitä peräkkäin (3 kpl tai 6 kpl), jolloin 3000 m<sup>2</sup>:n palo ylittää 3 × 36 m = 108 m:n ja 6000 m<sup>2</sup>:n palo ylittää 6 × 36 m = 216 m:n etäisyydelle.



Kuva 54. PAH-yhdisteiden pitoisuudet 0–100 m yltävällä pystysuuntaisella vyöhykkeellä eri etäisyyksillä tulipalosta. Kuvassa a) energiajäte, b) paperisilppu, c) PET-murska, d) rengasmurska, e) SER-murska ja f) yhdyskuntajäte. Palon kokoa (100 m<sup>2</sup>, 1 000 m<sup>2</sup>, 3 000 m<sup>2</sup>, 6 000 m<sup>2</sup>) on kuvattu eri väreillä. Tuulen nopeus lähellä maan pintaa on 5 m/s.

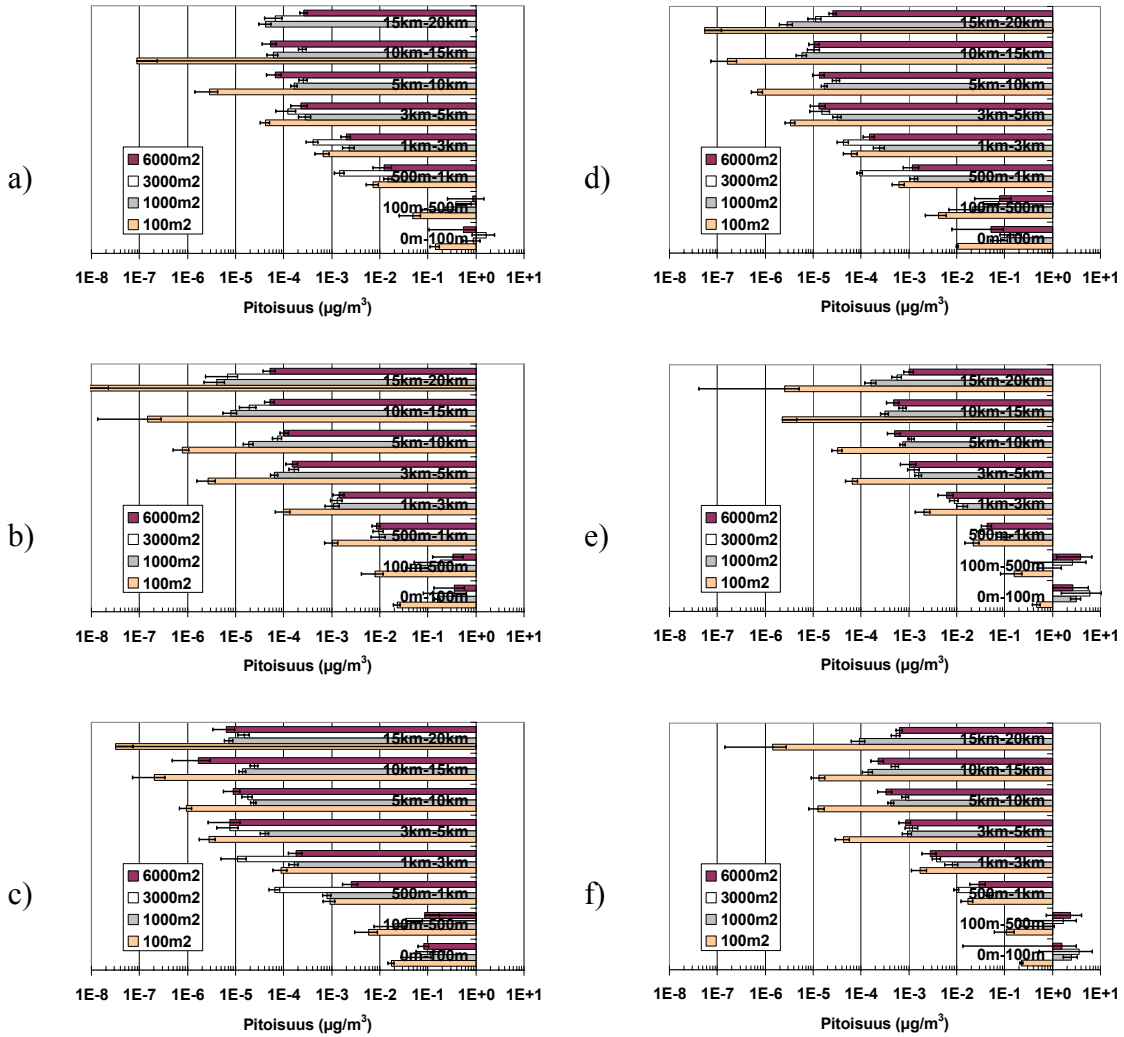


Kuva 55. PAH-pitoisuudet 0–100 m yltävällä pystysuuntaisella vyöhykkeellä eri etäisyyksillä tulipalosta. Kuvassa a) energijaae, b) paperisilppu, c) PET-murska, d) ren-gasmurska, e) SER-murska ja f) yhdyskuntajäte. Palon kokoa (100 m<sup>2</sup>, 1 000 m<sup>2</sup>, 3 000 m<sup>2</sup>, 6 000 m<sup>2</sup>) on kuvattu eri väreillä. Tuulen nopeus lähellä maan pintaa on 1 m/s.

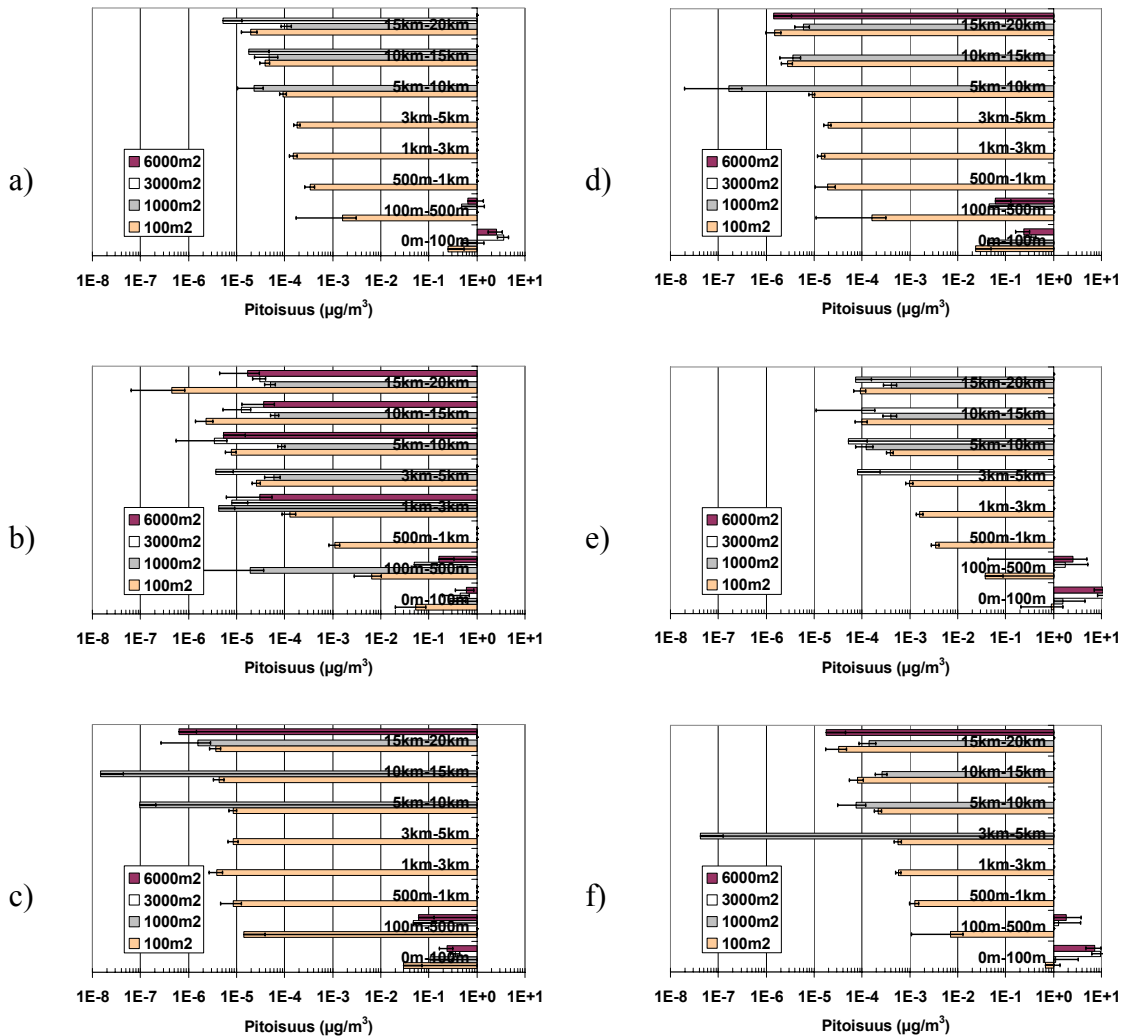
Kuvissa 56 ja 57 esitetään kloorifenolien pitoisuudet tarkastellulla 0–100 m:n pystysuuntaisella vyöhykkeellä, kun tuulen nopeus lähellä maanpintaa on 5 m/s (kuva 56) tai 1 m/s (kuva 57). Myös näistä tuloksista havaitaan samanlainen käytös tuulen nopeudesta riippuen kuin PAH-yhdisteidenkin tuloksissa. Päästöjen kulkeutumisen mallinnuksessa eri päästöt kuvataan massattomina hiukkasina, jotka kulkeutuvat passiivisesti savupilven osana. Näin ollen mallinnuksen tuloksiin ei vaikuta se mitä yhdistettä mallinnetaan, vaan ainoastaan päästökerroin, jolla ilmoitetaan yhdisteen vapautuminen palamisen aikana.

Yleinen silmäys tuloksiin paljastaa, että edellä esitettyjen PAH-pitoisuuksien ja nyt tarkasteltavien kloorifenolipitoisuuksien välillä on n. 1000-kertainen ero (huomaa yksik-

könä  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Tarkasteltaessa pinta-alaltaan yli 1 000  $\text{m}^2$ :n paloja voidaan sanoa kloorifenoli-pitoisuuksien olevan 0–500 m:n päässä palosta n. 0,1 ... 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  välillä. Vastaavat tulokset suuren mittakaavan kenttäkokeissa olivat 0,3–3,7  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ . Etäisyyden kasvaessa pitoisuudet laimenevat ja erot tasoittuvat n.  $10^{-5}$  ...  $10^{-3}$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$  välille. Pinta-alaltaan pienimmän (100  $\text{m}^2$ ) palon tapauksessa pitoisuudet ovat noin 100–1 000 kertaa pienempiä kuin edellä esitetyt pitoisuudet.

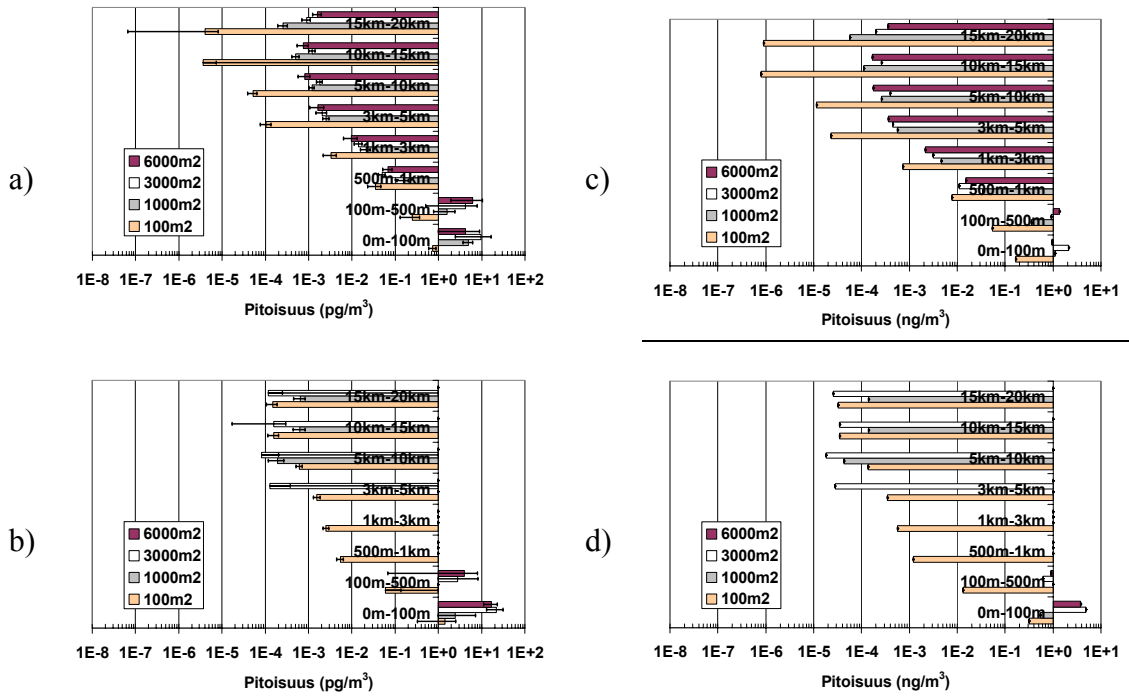


Kuva 56. Kloorifenolien pitoisuudet 0–100 m yltävällä pystysuuntaisella vyöhykkeellä eri etäisyyksillä tulipalosta. Kuvassa a) energiajäte, b) paperisilppu, c) PET-murska, d) rengasmurska, e) SER-murska ja f) yhdyskuntajäte. Palon kokoa (100  $\text{m}^2$ , 1 000  $\text{m}^2$ , 3 000  $\text{m}^2$ , 6 000  $\text{m}^2$ ) on kuvattu eri väreillä. Tuulen nopeus lähellä maan pintaa on 5 m/s.



Kuva 57. Kloorifenolien pitoisuudet 0–100 m yltävällä pystysuuntaisella vyöhykkeellä eri etäisyyksillä tulipalosta. Kuvassa a) energijaae, b) paperisilppu, c) PET-murska, d) rengasmurska, e) SER-murska ja f) yhdyskuntajäte. Palon kokoa (100 m<sup>2</sup>, 1 000 m<sup>2</sup>, 3 000 m<sup>2</sup>, 6 000 m<sup>2</sup>) on kuvattu eri väreillä. Tuulen nopeus lähellä maan pintaa on 1 m/s.

Lopuksi päästöjen kulkeutumista tarkastellaan PCDD- ja PCDF-yhdisteiden (dioksiinit ja furaanit) osalta. Tulokuvissa nähdään edelleen, jo aiemmin kuvailtu, tuulen vaikutus pitoisuuksiin, joissa 1 m/s tapauksessa yli 1 000 m<sup>2</sup> suurempien palojen savupilvet nousevat korkealle muodostaen palon ja n. 5 km:n välille vyöhykkeen, jossa pitoisuuksia ei havaita. Dioksiinien (PCDD) pitoisuudet ovat palon lähistöllä keskimäärin n. 0,1 ... 10 pg/m<sup>3</sup> välillä ja furaanien (PCDF) pitoisuudet n. 0,1 ... 10 ng/m<sup>3</sup> välillä. Suuren mittakaavan kokeissa mitatut pitoisuudet energijaaeaman palossa olivat n. 2 ng/Nm<sup>3</sup> ja paperipaalirivien palossa n. 0,1 ng/Nm<sup>3</sup>. Siirryttäessä kauemmaksi palosta pitoisuudet ovat dioksiinien osalta noin n. 10<sup>-4</sup> ... 10<sup>-2</sup> pg/m<sup>3</sup> välillä ja furaanien osalta n. 10<sup>-4</sup> ... 10<sup>-2</sup> ng/m<sup>3</sup> välillä.



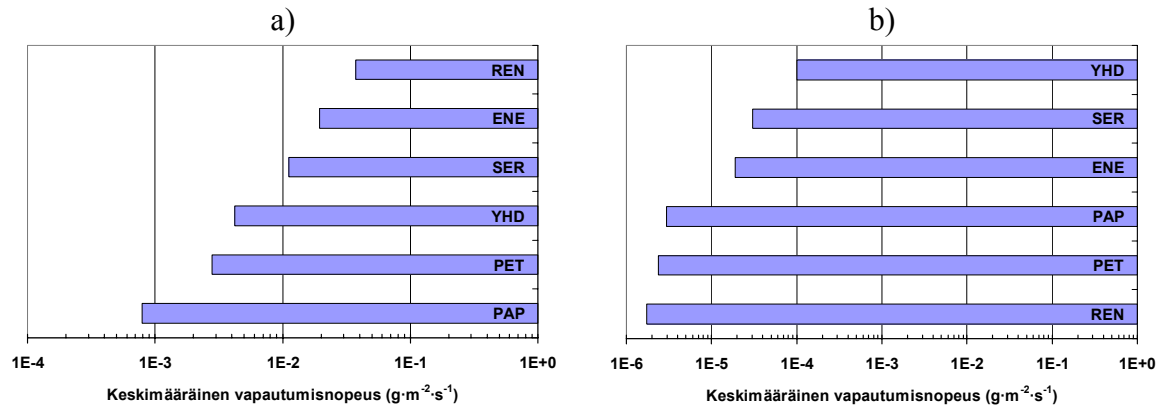
Kuva 58. PCDD-yhdisteiden pitoisuudet 0–100 m yltävällä pystysuuntaisella vyöhykkeellä eri etäisyyksillä tulipalosta, kun tuulen nopeus lähellä maanpintaa on a) 5 m/s ja b) 1 m/s. PCDF-yhdisteiden pitoisuudet 0–100 m yltävällä pystysuuntaisella vyöhykkeellä eri etäisyyksillä tulipalosta, kun tuulen nopeus lähellä maanpintaa on c) 5 m/s ja d) 1 m/s. Palon kokoa (100 m<sup>2</sup>, 1 000 m<sup>2</sup>, 3 000 m<sup>2</sup>, 6 000 m<sup>2</sup>) on kuvattu eri väreillä.

## 5.4 Yhteenvetoa päästöjen kulkeutumisen tuloksista

Päästöjen kulkeutumisessa tuulen vaikutus näkyi selvästi pitoisuuksien nousuna suurissa paloissa. Simuloidut päästöjen pitoisuudet vastasivat hyvin kenttäkokeista saatuja mitaustuloksia palojen lähistöllä. Simuloinnin tuloksista voitiin tarkastella tilannetta myös kauempana palosta, jossa pitoisuudet jo noin 1 km:n päästä palossa laimenivat tekijällä  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  alkuperäisestä, palon läheltä ennustetusta arvostaan. Kyseiset pitoisuudet tutkituilla päästöillä ovat pieniä verrattuna nykyisin voimassa oleviin raja-arvoihin. Muita päästöjä, kuten CO, ei simuloinneissa tutkittu. Kohdan 5.3 tuloksia voidaan hyödyntää mm. arvioitaessa mahdollisia jätekeskusten aiheuttamia riskejä muuhun ympäristöön. Kun tuloksia hyödynnetään, tulee arvioida kyseiseen tapaukseen liittyvät yksityiskohdat (vallitsevat tuulensuunnat ym.) sekä kohdan 5.3 tulosten soveltuvuus tarkasteltuun tapaukseen.

Tulosten vaihtelu eri jätejakeiden välillä – käytettäessä samoja lähtötietoja palon pinta-alalle ja tuulen nopeudelle – selittyy yksinomaan sillä, mitä jätejakeita on poltettu. Tätä jätejakeesta riippuvaa käyttäytymistä selvennetään kuvassa 59, jossa esitetään keskimääräiset vapautumisnopeudet ( $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ) pinta-alayksikköä kohden PAH- ja kloorifenoliyhdisteille.

Suurin PAH-yhdisteiden päästölähde tutkimuksessa käytetyistä jättejakeista on rengasmurska, kun taas paperisilppu tuottaa vähiten PAH-yhdisteitä. Vastaavasti suurimpana kloorifenolien lähteenä toimii yhdyskuntajäte rengasmurskan ollessa pienin kloorifenoli päästölähde.



Kuva 59. Tutkittujen eri jättejakeiden keskimääräiset a) PAH- ja b) kloorifenolien vapautumisnopeudet tulipalossa.

## 5.5 Palon leviämisoriskit

### 5.5.1 Palavan kohteen lähettämä lämpösäteily

Suuren palon pääasiallinen leviämismekanismi on lämpösäteily. Lämpösäteilyn voimakkuus ja altistusaika vaikuttavat kohteen syttymiseen<sup>4</sup>. Säteilyn ollessa pientä vaaditaan ulkoinen lämmönlähde, esim. kipinä, jotta syttymä aiheutuu. Suurilla säteilyintensiteeteillä tapahtuu spontaani syttyminen ilman ulkoista energialähdettä. Puulle alimpana lämpösäteilyn voimakkuutena, jolla spontaani syttymä aiheutuu, voidaan pitää arvoa  $12 \text{ kW/m}^2$  (Drysdale 1999).

Suuren mittakaavan kokeiden perusteella mitattuja lämpösäteilyarvoja käytetään tässä yhteydessä tarkasteltaessa palon leviämisoriskejä muuhun ympäristöön. Kuvassa 60a tarkastellaan esimerkinomaisesti kokeen 3 mittausjärjestelyjä, joissa tietyllä geometrisella tarkastelulla (kuva 60b) voidaan arvioida palavan energijaepäalin lähettämää lämpösäteilyä  $\dot{q}_s''$  pinta-alayksikköä kohden. Arviointia varten on tunnettava yhtälön (4) näkyvyystekijä  $\phi$  (Drysdale 1999) ja johonkin tiettyyn pisteeseen saapuva lämpösäteily

<sup>4</sup> verrannollisuus lämpösäteilyn voimakkuuden  $\dot{q}''$  ( $\text{kW/m}^2$ ) ja syttymisajan  $t_{ign}$  (s) välillä on seuraava:

$$\dot{q}'' \propto \frac{1}{\sqrt{t_{ign}}} \quad (\text{Drysdale 1999}).$$

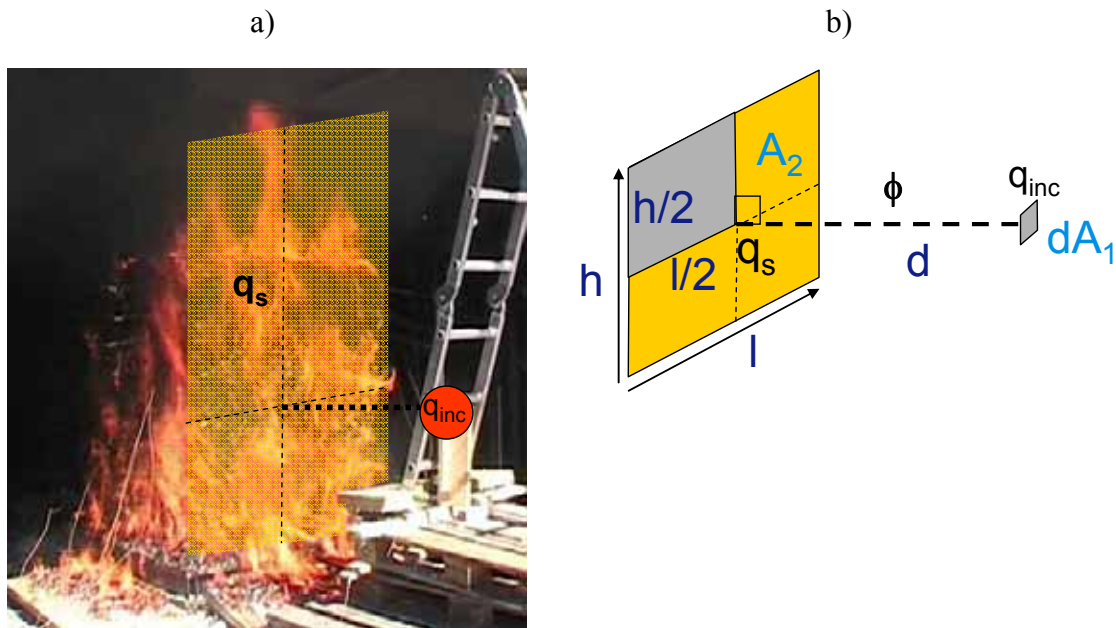
$\dot{q}_{inc}''$  – tässä tapauksessa mitatut koetulokset kokeesta 3. Palavan pinnan lähettämän ja vastaanottavaan pintaan saapuvan lämpösäteilyn välillä vallitsee seuraava yhteys:

$$\dot{q}_s'' = \phi \dot{q}_{inc}'', \quad (4)$$

jossa näkyvyystekijä  $\phi$ , kuvan 60b geometrian avulla ilmaistuna, koko  $h \times l$ -pinta-alalle on

$$\phi = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{\left(\frac{h}{2}\right)}{\sqrt{\left(\frac{h}{2}\right)^2 + d^2}} \tan^{-1} \left( \frac{\left(\frac{l}{2}\right)}{\sqrt{\left(\frac{h}{2}\right)^2 + d^2}} \right) + \frac{\left(\frac{l}{2}\right)}{\sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + d^2}} \tan^{-1} \left( \frac{\left(\frac{h}{2}\right)}{\sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + d^2}} \right) \right], \quad (5)$$

jossa  $h$  (m) on säteilevän pinnan (esim. palavan paalirivin) korkeus,  $l$  (m) pituus ja  $d$  (m) etäisyys palavasta kohteesta uhattuna olevaan kohteeseen.



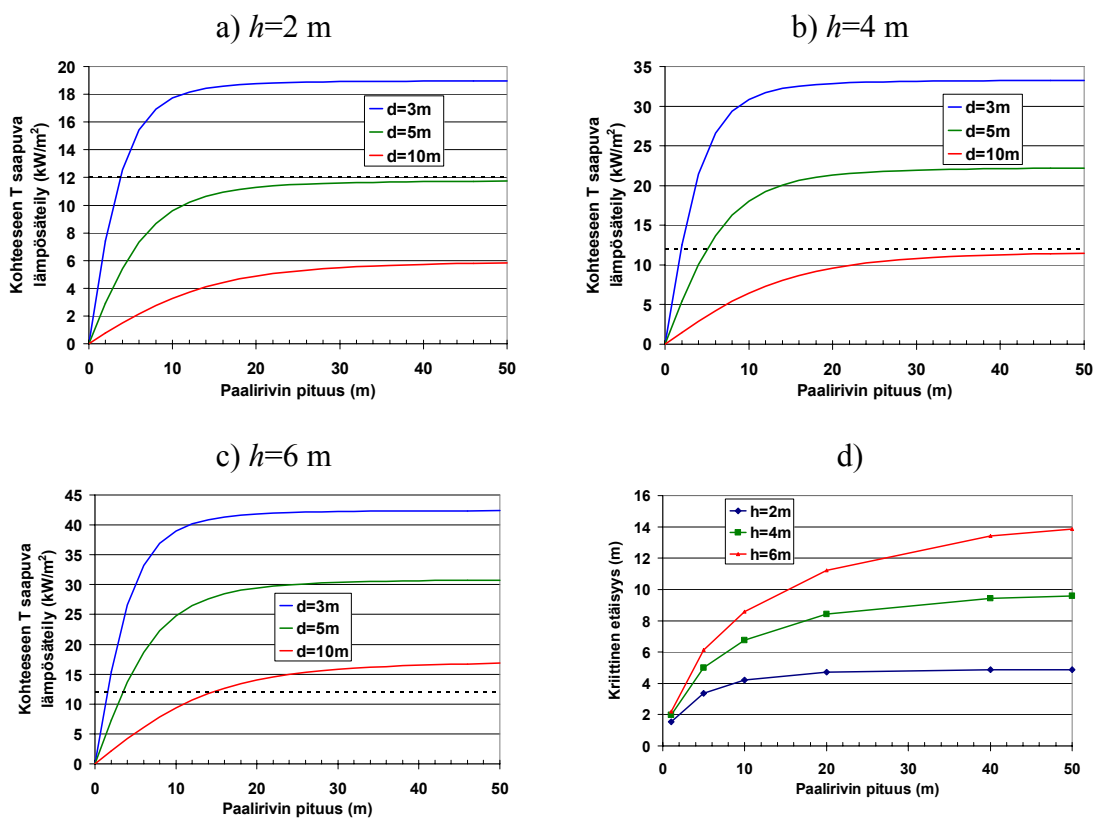
Kuva 60. Palavan paalin lähettämän lämpösäteilyn arviointiin liittyvät tekijät. Yhtälössä (5) esitetään näkyvyystekijän  $\phi$  lauseke kuvassa b) esiintyvään geometriaan.

Kokeissa 3, 4 ja 5 mitattujen lämpösäteilyarvojen perusteella lasketut liekkien lähettämät lämpösäteilytasot olivat n.  $60 \text{ kW/m}^2$ . Tätä arvoa käytetään kohdan 5.5.2 laskennallisissa esimerkeissä, joissa arvioidaan palavan kohteen dimensioiden vaikutusta siihen, kuinka suuri lämpösäteily kohdistuu ympäristöön.



## 5.5.2 Kriittinen etäisyys palavasta kohteesta, kun pinta-ala on vakio

Seuraavaksi tarkastellaan tapausta, jossa palava kohde on yksittäinen paalirivi, jolla on korkeutta 2, 4 tai 6 m. Tapauksessa oletetaan, että koko paalirivi palaa kauttaaltaan. Kuvassa 61 esitetään, miten palavan kohteen  $S$ -dimensiot (korkeus  $h$ , pituus  $l$ ) ja etäisyys  $d$  uhattuna olevasta kohteesta  $T$  vaikuttavat kohteeseen  $T$  kohdistuvaan lämpösäteilyintensiteetitasoon. Esimerkeissä ei oteta huomioon liekkien korkeudesta aiheutuvaa säteilevän pinta-alan kasvua, vaan palon oletetaan rajoittuvan pinta-alaltaan  $h \times l$  suoruisen paalirivin sivuun. Lisäksi oletetaan, että palavan pinnan lämpösäteilyn voimakkuus on  $60 \text{ kW/m}^2$  ja uhattuna olevan kohteen syttymisraja on  $12 \text{ kW/m}^2$ .



Kuva 61. Laskennallisesti määritetty kohteen  $T$  vastaanottama lämpösäteily paalirivin pituuden funktiona, kun paalirivin korkeus on a) 2 m, b) 4 m, c) 6 m. Kuvissa a)–c) syttymisraja  $12 \text{ kW/m}^2$  on esitetty katkoviivoin. Kuvassa d) tarkastellaan kriittistä etäisyyttä palavan ja uhattuna olevan kohteen välillä. Tapauksissa a)–d) syttymisrajana on käytetty arvoa  $12 \text{ kW/m}^2$  ja palavan kohteen lähettämänä lämpösäteilytasona arvoa  $60 \text{ kW/m}^2$ .

Kuvan 61 laskennallisista tarkasteluista havaitaan, että uhattuna olevaan kohteeseen tuleva lämpösäteily kasvaa jyrkästi, kun palavan kohteen dimensiot kasvavat ja etäisyys pienenee. Lämpösäteilyn muutos ei ole kovin suurta enää sen jälkeen, kun palavan paalirivin pituus kasvaa n. 20 metriin saakka. Kuvassa 61d tilannetta on vielä tarkasteltu

toisinpäin ratkaisemalla numeerisesti yhtälöstä (5) se kriittinen etäisyys  $d_{crit}$  (m), jolla syttyminen olisi vielä mahdollista, kun syttymisrajana on  $12 \text{ kW/m}^2$  palavan pinnan lähettämässä  $60 \text{ kW/m}^2$ :n lämpösäteilyä. Kuvaa 61d tulkittaessa voidaan sanoa, että esim. 2 m:n korkuisten paalirivien etäisyys toisistaan tulisi olla vähintään 5 m, jotta tulipalotilanteessa palo ei leviäisi toiseen paaliriviin lämpösäteilyn vaikutuksesta.

On huomioitava, että tämän ja seuraavan luvun tarkasteluissa palon leviämistä tarkastellaan pelkästään lämpösäteilyn avulla. Palo kuitenkin voi levitä paalirivistä toiseen myös lentävien kipinöiden avulla tai esim. palavan paalirivin sortuessa, jolloin palo levittäytyy laajemmalle alalle ja samalla lähemmäksi naapuripaalirivejä. Katettujen tilojen tapauksessa palon leviäminen tapahtuu myös kuumien palokaasujen vaikutuksesta, jotka edelleen voimistavat uhattuina oleviin kohteisiin kohdistuvaa lämpösäteilyä.

Edellä esitetyn (kuva 61d) palavan paalirivin pituuden ja kriittisen etäisyyden välinen yhteys voidaan esittää myös suljetussa muodossa olevalla lausekkeella (Hietaniemi 1996), jossa kriittisen etäisyyden  $d_{crit}$  (m) riippuvuus paalirivin pituudesta  $l$  (m) ja korkeudesta  $h$  (m) esitetään yhtälöiden (6)–(8) avulla seuraavasti:

$$d_{crit}(h,l) = \frac{f(h) \cdot l}{g(h) + l}, \quad (6)$$

jossa funktiot  $f$  ja  $g$  ovat pienimmän neliösumman menetelmällä sovitettuja potenssi-funktioita:

$$f(h) = A_1 \cdot h^{k_1} \quad (7)$$

ja

$$g(h) = A_2 \cdot h^{k_2}, \quad (8)$$

joissa  $A_i$  ja  $k_i$  ovat vakioita.

Jotta yhtälöitä (6)–(8) voidaan soveltaa, tulee arvioida palavan pinnan lähettämä lämpösäteilytaso ja syttymiskriteerinä käytetty lämpösäteilytaso uhattuna olevalle kohteelle. Taulukossa 15 esitetään yhtälöissä (6)–(8) esiintyvien vakioiden numeroarvot eri tapauksissa, joissa palava pinta lähettää joko  $40 \text{ kW/m}^2$ ,  $60 \text{ kW/m}^2$  tai  $100 \text{ kW/m}^2$ :n lämpösäteilyä<sup>5</sup> ja uhattuna olevan kohteen syttymisraja on joko  $12 \text{ kW/m}^2$  tai  $20 \text{ kW/m}^2$ .

---

<sup>5</sup> vastaavat noin  $700 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  tai  $950 \text{ }^\circ\text{C}$ :n lämpötiloja.

Taulukko 15. Palavan ja uhattuna olevan kohteen välillä olevan kriittisen etäisyyden määrittämiseen käytettävien vakioiden lukuarvot (yhtälöt (6)–(8)).

Palavan kohteen lähettämä lämpösäteily (kW/m <sup>2</sup> )	Uhattuna olevan kohteen syttymisraja (kW/m <sup>2</sup> )	$k_1$	$k_2$	$A_1$	$A_2$
40	12	1,04	1,15	1,63	0,78
40	20	1,04	1,12	0,88	0,57
60	12	1,03	1,11	2,54	1,14
60	20	1,04	1,15	1,45	0,73
100	12	0,97	0,93	4,5	2,15
100	20	1,03	1,11	2,53	1,14

Tarkasteltaessa esimerkiksi 14 m pitkää ja 6 m korkeaa paaliriviä, jonka pitkän sivun palaessa kauttaaltaan oletetaan lähettävän 60 kW/m<sup>2</sup>:n suuruista lämpösäteilyä uhattuna olevaan kohteeseen, jonka syttymisrajana pidetään arvoa 12 kW/m<sup>2</sup>, voidaan yhtälöiden (6)–(8) ja taulukon 15 lukuarvojen avulla ratkaista kriittinen etäisyys seuraavasti:

$$d_{crit} = \frac{A_1 \cdot h^{k_1} \cdot l}{A_2 \cdot h^{k_2} + l} = \frac{2,54 \cdot (6 \text{ m})^{1,03} \cdot 14 \text{ m}}{1,14 \cdot (6 \text{ m})^{1,11} + 14 \text{ m}} = 10 \text{ m}.$$

### 5.5.3 Kriittinen etäisyys palavasta kohteesta, kun pinta-ala muuttuu

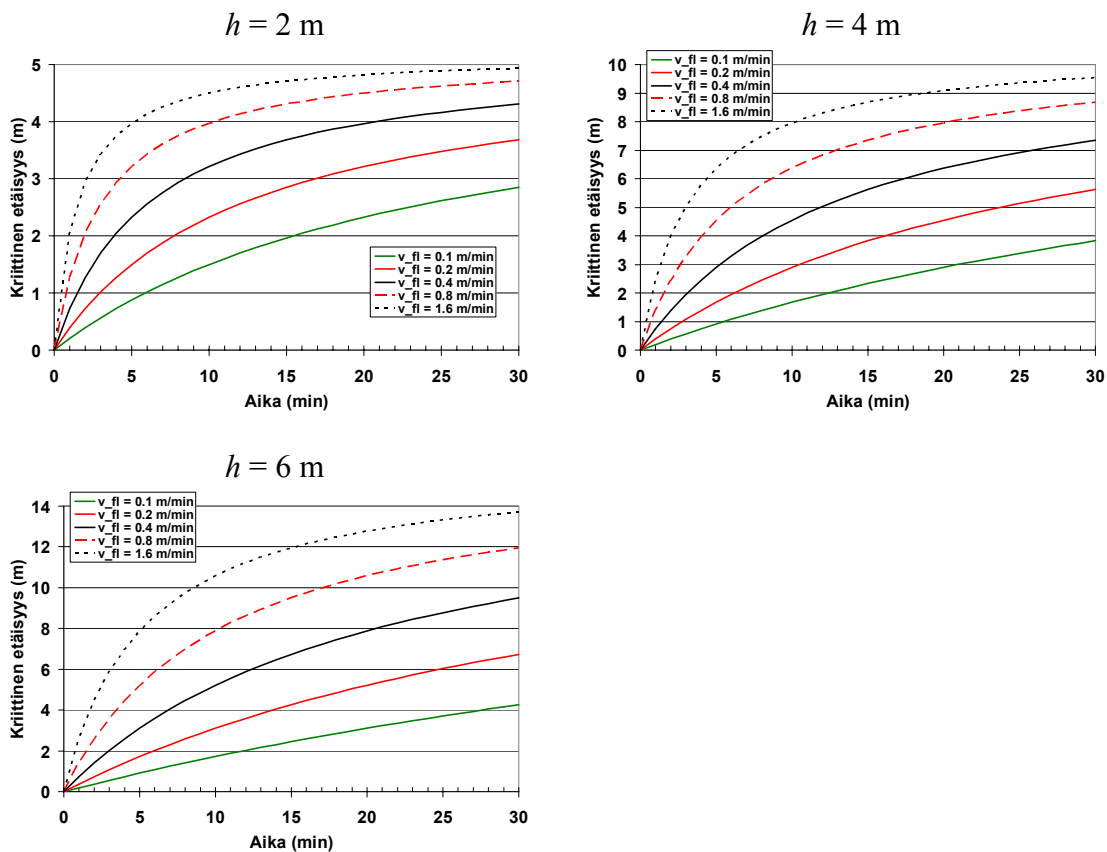
Edellisessä luvussa oletettiin, että palavan kohteen pinta-ala oli vakio ts. paalirivi paloi kauttaaltaan pituus- ja korkeussuunnassa. Tämä vastaa pahinta mahdollista skenaariota, jonka mukaan kriittinen etäisyys voidaan määrittää. Kun halutaan tarkastella palavan pinta-alan kehittymistä ajan suhteen, voidaan yhtälöiden (6)–(8) tekijä  $l$  (m) korvata (paalirivin pituussuuntaisen) liekinleviämisenopeuden  $v_{fl}$  (m/min) ja ajan  $t$  (min) tulona,  $l = v_{fl} \cdot t$ , jolloin palava pinta-ala, korkeuden ollessa vakio, kasvaa lineaarisesti ajan suhteen.

Kun edellä esitetyt oletukset on tehty, voidaan kriittistä etäisyyttä tarkastella ajan funktiona eri liekinleviämisenopeuksilla (liekinleviämisenopeuksista saatiin arvioita myös tämän työn suuren mittakaavan kokeista), jolloin tuloksista voidaan arvioida esim. sammutustöiden alkamisajankohtaa suhteessa siihen, onko senhetkisestä palosta uhkaa ympärillä oleville kohteille.

Kuvassa 62 esitetään eräs tällainen tapaus, jossa tarkastellaan esimerkkiä palon ajallisesta kehityksestä, jossa paalirivin korkeus, ja samalla palon korkeus, on joko 2, 4 tai 6 m ja

palon oletetaan lähettävän  $60 \text{ kW/m}^2$ :n suuruista lämpösäteilyä uhattuna olevaan kohteeseen, jonka syttymisraja on  $12 \text{ kW/m}^2$ . Palon kehittymistä (eli sitä miten palava osuus  $l = v_{fl} \cdot t$  paalirivissä etenee) kuvataan eri liekinleviämisenopeuksilla  $0,1\text{--}1,6 \text{ m/min}$ .

Kuvan 62 tuloksissa esitetään kriittinen etäisyys  $d_{crit}$  (m) suhteessa palon ajalliseen kestoon ensimmäisen 30 minuutin ajalta. Tulokset ovat esimerkkejä, mutta ne osoittavat samalla, kuinka nopeasti tilanne voi muuttua, jos palamiselle on suotuisat olosuhteet (esim. geometria, palavan materiaalin laatu).



Kuva 62. Ajan funktiona muuttuva kriittinen etäisyys erikorkuisten paalirivien palaessa eri liekinleviämisenopeuksilla tapauksessa, jossa palon oletetaan säteilevän  $60 \text{ kW/m}^2$ :n voimakkuudella uhattuna olevaan kohteeseen, jonka syttymisrajaksi oletetaan arvoa  $12 \text{ kW/m}^2$ .

## 6. Yhteenveto

Hankkeen keskeisenä tavoitteena oli kartoittaa jätekeskusten paloturvallisuuteen liittyviä tekijöitä sekä jätteiden palamisen ympäristölle aiheuttamia uhkia. Kuva Suomen jätekeskusten paloturvallisuustilanteesta pyrittiin kartoittamaan jäte- ja pelastusalan toimijoille suunnatulla kyselytutkimuksella ja lyhyellä katsauksella sattuneisiin tulipaloihin. Hankkeen kokeellisessa osuudessa tarkasteltiin eri jättemateriaalien palamista ja sammuttamista ja analysoitiin sekä savukaasujen että sammutusjätevesien koostumuksia. Kokeellisten tulosten perusteella arvioitiin tutkittujen jättemateriaalien aiheuttamaa uhkaa ympäristölle tulipalotilanteessa.

Jäte- ja pelastusalan toimijoille suunnattuun kyselyyn saatiin 41 vastausta jätealan edustajilta ja 19 vastausta pelastusviranomaisilta. Vastauksissa tulipalojen ennaltaehkäisevinä toimina nousivat esille mm. jatkuvan koulutuksen ja riskien säännöllisen kartoittamisen tarve, joiden pitäisi muodostua osaksi yrityksen normaalia toimintaa. Vastausten perusteella huomattava osa yrityksistä ei ollut järjestänyt henkilökunnalle minkäänlaista koulutusta eikä kaikilla ollut myöskään kirjallisia ohjeita tulipalotilanteen varalta. Todettiin myös, että säännöllinen laitehuolto ja siivous ovat yksinkertainen keino riskien pienentämiseen, helposti syttyviä materiaaleja ei tule sijoittaa laitteiden välittömään läheisyyteen ja jätteiden varastoimista liian lähelle toisiaan ja suurina kasoina tulee välttää. Myös kiertonopeuden nostaminen vähentää syttymisriskiä.

Tulipalojen sammuttamisen osalta keskeisimpinä seikkoina nousivat esille alkusammutuskapasiteetin riittävyys sisätiloissa ja ulkoalueilla. Sammutustyön onnistumisen osalta huomio pitää kohdistaa lisäsammutusveden saatavuuteen, jotta sammuttaminen on turvattu myös suurempien tulipalojen sammuttamisessa. Sammutusvesien talteenotto on toistaiseksi harvassa paikassa järjestetty. Automaattisten hälytys- ja sammutusjärjestelmien asentaminen voi olla hyvä lisäturva useassa tapauksessa. Usein tulipalotilanteessa joudutaan turvautumaan järeään raivauskalustoon, jonka saatavuus on varmistettava tulipalotilanteen varalta.

Myös katsaus viime vuosina sattuneisiin tulipaloihin osoitti selkeästi sen, että jätepalojen sammuttaminen on haastavaa ja pitkäkestoista johtuen osin suurista palavista pintaloista, joita joudutaan repimään auki. Tällöin myös sammutusveden riittävyyden turvaaminen on tärkeää. Useissa tapauksissa tulipalolla on ollut vaikutusta myös lähiympäristöön, esimerkiksi lähialueiden asukkaita on evakuoitu. Myös omaisuusvahingot ja sammutustyön kustannukset voivat nousta hyvin suuriksi.

Hankkeen kokeellisessa osuudessa suoritettiin polttokokeita pienessä ja suuressa mittakaavassa. Pienen mittakaavan kokeet tehtiin kartiokalorimetrialaitteistolla kuudelle eri jättejakeelle, joita olivat: PET-murska, paperisilppu, energiajäte, rengasmurska, yhdys-

kuntajäte ja SER-murska. Kokeista mitattiin eri jätejakeiden palamisominaisuuksia ja palamisen aikana muodostuvia savukaasupäästöjä. Kokeiden perusteella määritettiin jätejaekohtaiset päästökertoimet haitallisille PAH-, kloorifenoli- ja PCDD/F-yhdisteille. Kirjallisuudessa ei ole esitetty aiemmin päästökertoimia palamisen yhteydessä kyseisille jätejakeille.

Suuren mittakaavan kokeissa poltettiin kahta jätemateriaalia, paperisilppua ja energiajajetta. Kokeita tehtiin yhteensä viisi, joista kolmessa poltettiin yksittäisiä paperi- ja energiajajepaaleja ja kahdesta suuremmasta kokeesta toisessa 4 × 6 m kokoiseen miiluuun kasattua energiajajeaumaa ja toisessa kokeessa kahta rinnakkaista 8 m pitkää ja 1,6 m korkeaa paperipaalirivistöä. Suuren mittakaavan kokeissa tarkasteltiin myös jätepalojen sammuttamista ja analysoitiin savukaasujen ja sammutusjätevesien koostumusta. Energiajajepaalien paloista yksi sammutettiin vedellä ja toinen A-vaahdolla. Yksittäinen paperipaali, energiajajeauma ja paperipaalirivistöt sammutettiin vedellä.

Tutkituista sammutusvesinäytteistä ei löydetty tässä tutkimuksessa analysoituja klooribentseeneitä, PCB-yhdisteitä, dioksiineja tai furaaneita. PAH-yhdisteiden osalta havaitut pitoisuudet olivat selkeästi suuremmat silloin, kun sammutusaineena käytettiin veden pintajännitystä alentavaa lisäainetta ja vettä (A-vaahto) verrattuna pelkän veden käyttämiseen sammutteena. Ero saattoi johtua lisäaineen ominaisuuksista, joka on voinut esim. estää PAH-yhdisteen sitoutumista orgaaniseen ainekseen tai lisätä sen liukenevuutta sammutusjäteveteen sammutetusta jätemateriaalista. Itse sammutustyön suorittamisessa korostuivat mm. paineilmalaitteiden käyttö, koneelliseen sammutusraivaukseen varautuminen ja sammutusveden runsas käyttö. Sammutustyön havaittiin nopeutuvan sammutusveteen lisätyn ja pintajännitystä alentavan lisäaineen johdosta.

Sekä pienen että suuren mittakaavan kokeiden tuloksia hyödynnettiin laskennallisissa tarkasteluissa, joiden tarkoituksena oli pyrkiä arvioimaan kyseisten materiaalien palamisen aiheuttamaa uhkaa ympäristölle.

Laskennallisissa tarkasteluissa tehtiin esimerkkitapauksia, joissa erikokoisten palojen aiheuttamaa päästöjen kulkeutumista simuloitiin tutkituilla jätejakeilla käyttämällä kokeellisia päästökertoimia. Yleisesti ottaen simuloitujen pitoisuuksien vastasivat hyvin suuren mittakaavan poltoissa mitattuja savukaasupitoisuuksia PAH-, kloorifenoli- ja PCDD/F-yhdisteille palon lähellä. Lasketut tulokset osoittivat hyvin, kuinka pitoisuudet laimenevat palon lähellä olevista arvoista n. tekijällä  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  mentäessä kilometrien päähän palosta. Sekä mitatut että lasketut pitoisuudet palon lähellä olivat pieniä verrattuna sosiaali- ja terveysministeriön asettamiin HTP-arvoihin.

Tarkasteltaessa keskimääräisiä päästöjen vapautumisnopeuksia pinta-alayksikköä kohden havaittiin, että suurin PAH-yhdisteiden päästölähde tutkimuksessa käytetyistä jätejakeista

oli rengasmurska, kun taas paperisilppu tuotti vähiten PAH-yhdisteitä. Vastaavasti suurimpana kloorifenolien lähteenä toimi yhdyskuntajäte rengasmurskan ollessa pienin kloorifenolien päästölähde.

Palon leviämisen osalta tarkasteltiin laskennallisin esimerkein tilanteita, joissa palo voisi levitä palavasta kohteesta toiseen lämpösäteilyn vaikutuksesta. Tarkasteluissa voidaan määrittää turvaetäisyyksiä kohteiden, esim. paalirivien, välillä. Näistä tuloksista muodostettiin yleinen malli, jota voidaan soveltaa turvaetäisyyksien määrittämiseen.

Sekä päästöjen kulkeutumisen että palon leviämisen esimerkeistä saadut tulokset ovat sellaisenaan yleispäteviä ja niitä voidaan käyttää mm. arvioitaessa ympäristöön kohdistuvia riskejä, jätekeskusten muuhun suunnitteluun ja ohjeistukseen. Tulosten soveltuvuutta tulee kuitenkin tarkastella tapauskohtaisesti siten, että esim. jätekeskuksen ominaispiirteet tulevat otetuksi huomioon ja tarkastelu tehdään kokonaisvaltaisesti.

## Lähdeluettelo

2000/76/EY. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2000/76/EY jätteenpoltosta. 4.12.2000, Bryssel.

2004/850/EY. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus N:o 850/2004, annettu, pysyvistä orgaanisista yhdisteistä sekä direktiivin 79/117/ETY muuttamisesta. 29.4.2004, Bryssel.

Ahlborg, U.G., Håkansson, H., Wärn, F., Hahnberg, A. 1988. Nordisk dioxinriskbedömning. Nordic Council of Ministers. Miljörapport 1988:7. Copenhagen, Denmark. (In Swedish, with English summary)

Anon 2005. Jätekesä kytteä yhä Turussa. Helsingin Sanomat. 7.2.2006.

Anon. 2006a. Hyötypaperille tulipalosta 500 000 euron vahingot. Etelä-Saimaa 23.5.2006, s. 8.

Anon. 2006b. Paperivaraston palosta miljoonavahingot Seinäjoella. Turun Sanomat, verkkolehti. Julkaistu 16.6.2006.

Anon 2006c. Jätepaperivaraston palosta miljoonavahingot Seinäjoella. Helsingin Sanomat, HS.fi. Julkaistu 15.6.2006.

Anon 2006d. Teollisuushallin palosta miljoonavahingot Seinäjoella. MTV3-uutiset. <http://www.mtv3.fi>. Julkaistu 15.6.2006.

Anon 2006e. Rengaspinnoittamo paloi maan tasalle Pernajassa. Helsingin Sanomat 20.7.2006.

Anon 2006f. Rengaspinnoittamon palosta pelastui vain mappeja. Loviisan Sanomat 21.7.2006.

Anon 2006g. Rengaspalot usein ylivoimaisia. Loviisan Sanomat 21.7.2006.

Anon 2007a. Jätekesä ei saatu sammumaan. Helsingin Sanomat 21.4.2007.

Anon 2008. Paperinkeräyshallien jälkisammutus jatkuu keskiviikkoamuun. Ilkka, verkkolehti. Julkaistu 3.6.2008.



Anttonen, S. & Onali, A. Uusi kompostointilaitos valmis Joutsenossa talvella. Etelä-Saimaa, artikkelitietokanta. Julkaistu 24.6.2008.

ATDSR. 1995. Toxicological profile for polycyclic aromatic hydrocarbons. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry.

Backman, N.-E. 2007. Kytevä rakennusjättekasa harmittaa asukkaita ja viranomaisia Turussa. Jätteenkäsittely- ja kierrätyslaitosta ei haluta uuteenkaan paikkaan. Helsingin Sanomat 21.4.2007.

Bhargava, A., Dlugogorski, B. & Kennedy, E. 2002. Emission of polyaromatic hydrocarbons, polychlorinated biphenyls and polychlorinated dibenzo-p-dioxins and furans from fires of wood chips. *Fire Safety Journal*, 37: 659–672.

Bhavsar, S., Reiner, E., Hayton, A., Fletcher, R. & MacPherson, K. 2008. Converting Toxic Equivalents (TEQ) of dioxins and dioxin-like compounds in fish from one Toxic Equivalency Factor (TEF) scheme to another. *Environment International*, 34: 915–921.

Blomqvist, P., Persson, B. & Simonson, M. 2007. Fire Emissions of Organics into the Atmosphere. *Fire Technology*, 43: 213–231.

Blomqvist, S. & Sjöholm, J. Biojätteen käsittelylle on löydettävä väliaikainen ratkaisu. Etelä-Saimaa, artikkelitietokanta. Julkaistu 23.6.2008.

Chrysikou, L., Gemenetzi, P., Kouras, A., Manoli, E., Terzi, E. & Samara, C. 2008. Distribution of persistent organic pollutants, polycyclic aromatic hydrocarbons and trace elements in soil and vegetation following a large scale landfill fire in northern Greece. *Environment International*, 34: 210–225.

Collins, J.F., Brown, J.P., Alexeeff, G.V. & Salmon, A.G. 1998. Potency Equivalency Factors for Some Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Derivatives. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 28: 45–54.

Domingo, J.L., Granero, S. & Schuhmacher, M. 2001. Congener profiles of PCDD/Fs in soil and vegetation samples collected near to a municipal waste incinerator. *Chemosphere*, 43: 517–524.

Drysdale, D. 1999. An introduction to fire dynamics. 2nd Ed. Chichester, GB: John Wiley & Sons. 451 s. ISBN 0-471-97290-8.

EEA. European Environment Agency, Environmental Terminology Discovery Service. [http://glossary.eea.europa.eu/terminology/concept\\_html?term=emission%20factor](http://glossary.eea.europa.eu/terminology/concept_html?term=emission%20factor).

ENV.A.2/ETU/2004/0044. European Commission, Study to facilitate the implementation of certain waste related provisions, of the Regulation on Persistent Organic Pollutants (POPs). Summary report. Bryssel, 2005.

Ettala, M., Rahkonen, P., Rossi, E., Mangs, J. & Keski-Rahkonen, O. 1996. Landfill fires in Finland. *Waste Management & Research*, 14: 377–384.

Gao, L. & Hirano, T. 2006. Process of accidental explosions at a refuse derived fuel storage. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19: 288–291.

Hietaniemi, J. & Rinne, T. 2005. Tulipalojen yksittäispäästöt ilmaan: laskennallinen lähestymistapa. Espoo, VTT. VTT Working Papers; 37. 78 s. ISBN 951-38-6588-6. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2005/W37.pdf>.

Hietaniemi, J. 1996. Kriittinen etäisyys palavasta puutavaravarastosta. Raportti nro. 60. Palotutkimusraati ry. 23.12.1996.

Hogland, W. & Marques, M. 2003. Physical, biological and chemical processes during storage and spontaneous combustion of waste fuel. *Resources, Conservation and Recycling*, 40: 53–69.

HTP-arvot 2007. Haitalliseksi tunnetut pitoisuudet. Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisuja 2007:4. Helsinki 2007.

Hyvärinen I. 2006. Tuli tuhosi jätehallin Kajaanissa. *Helsingin sanomat*. 15.3.2006. s. A11.

Härkönen, L. 2005. Rakennusjättekasa levittää savua Turussa. Kasa saattaa palaa useita päiviä. *Helsingin Sanomat* 6.2.2005.

IARC. 1997. Polychlorinated dibenzo-para-dioxins and polychlorinated dibenzofurans. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, 69. Lyon.

IARC. 1997. Polychlorinated Dibenzo-para-Dioxins and Polychlorinated Dibenzofurans, Summary of Data Reported and Evaluation. World Health Organization International Agency for Research on Cancer, IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Volume 69.

IARC. 2008. (WWW-sivusto). <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/crthgr01.php> (viitattu 3.10.2008).

ILO. International Occupational Safety and Health Information Centre (CIS). Kemikaalikirjoitus: bentso(a)pyreeni. (WWW-sivu) <http://www.ilo.org/public/english/protection/safework/cis/products/icsc/dtasht/icsc01/icsc0104.htm> (viitattu 9.10.2008).

ISO 11338-1:2003. Stationary source emissions. Determination of gas and particle-phase polycyclic aromatic hydrocarbons. Part 1: Sampling. Suomen Standardisoimisliitto SFS, 12.6.2003.

ISO 12884:2000. Ambient air. Determination of total (gas and particle-phase) polycyclic aromatic hydrocarbons. Collection on sorbent-backed filters with gas chromatographic/mass spectrometric analyses. Suomen Standardisoimisliitto SFS, 6.4.2000.

Kanerva, J. 2006. Tulipalo tuhosi 600 tonnia kierrätyspolttainetta Lappeenrannassa. Pelastustieto 5/2006. s. 13–14.

Karttunen, M.-R. 2007. Tulipalo tuhosi Tuusulassa ongelmajätelaitoksen vastaanotto-pisteen. Palosta pääsi ilmaan myrkyllisiä savukaasuja. Helsingin Sanomat 4.7.2007.

Kiuru, K. 2004. Keimolan rengasmiilu paloi koko päivän. Helsingin Sanomat 4.1.2004. s. C7.

Koivunen, P. 2008. Paljon paloi paperia Seinäjoella. Sopimuspalokuntalainen, 23. s. 50–51.

Korteniemi, O. 2004. Talvi esti ympäristötuhoilta Keimolan rengaspalossa. Pelastustieto 1/2004. s. 11–13.

Kuusela, A. 2007. Suomen Rakennusjätteen siirrettävä Turun Saramäen kytevä jätekeko. Pelastuslaitos vaatii kasan nopeaa purkamista. Turun Sanomat 20.4.2007.

Lemieux, P., Lutes, C. & Santoianni, D. 2004. Emissions of organic air toxics from open burning: a comprehensive review. Progress in Energy and Combustion Science, 30: 1–32.

Lönnermark, A., Blomqvist, P. & Marklund, S. 2008. Emissions from simulated deep-seated fires in domestic waste. Chemosphere, 70: 626–639.

Malkamäki, E. 2007. Rakennusjätekeko paloi Saramäessä. Turun Sanomat 30.3.2007.

Manahan, S. 2005. Environmental Chemistry. CRC Press.

Martens, D., Balta-Brouma, K., Brotsack, R., Michalke, B., Schramel, P., Klimm, C., Henkelmann, B., Oxyinos, K., Schramm, K.-W., Diamadopoulos, E. & Kettrup, A. 1998. Chemical impact of uncontrolled solid waste combustion to the vicinity of the kouroupitos ravine, Crete, Greece. *Chemosphere*, 36: 2855–2866.

McGrattan, K.B., Baum, H.R., Walton, W.D. & Trelles, J.J. 1997. Smoke Plume Trajectory From In Situ Burning of Crude Oil in Alaska: Field Experiments and Modeling of Complex Terrain. NISTIR 5958, NIST SP 995, Vol. 2. 135 s.

Mikkola, E. 1990. Kartiokalorimetri. Espoo, VTT. VTT Tiedotteita 1087. 22 s. ISBN 951-38-3638-X.

Mikkonen, M. 2004. Palaneiden renkaiden päällä on nyt 350 rekkakuormaa maata. *Helsingin Sanomat* 6.1.2004.

Mäenpää, I., Härmä, T., Rytönen, T., Merilehto, K., Sokka, L., Espo, J. & Kaplas, M. 2006. Finwaste-hankkeen loppuraportti, Jätevirrat ja jäteintensiteetin muutos Suomen taloudessa 1997–2003. Suomen ympäristö 44/2006, Ympäristönsuojelu, Suomen ympäristökeskus.

Nammari, D.R., Hogland, W., Marques, M., Nimmermark, S. & Moutavtchi, V. 2004. Emissions from a controlled fire in municipal solid waste bales. *Waste Management*, 24: 9–18.

Naturvårdsverket, Ruotsin ympäristökeskus (www-sivu). <http://www.naturvardsverket.se/sv/Produkter-och-avfall/Avfall/Hantering-och-behandling-av-avfall/Avfallsforbranning/Utslapp-fran-avfallsforbranning/> (viitattu 15.8.2008).

NIST. Sander, L.C. & Wise, S.A.. NIST Special Publication 922 Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Structure Index (WWW-sivusto). <http://ois.nist.gov/pah/> (viitattu 5.10.2008).

OEHHA. 1994. Executive summary, benzo[a]pyrene as a toxic air contaminant. The California Air Resources Board and the Office of Environmental Health Hazard Assessment.

Ogura, I., Masunaga, S. & Nakanishi, J. 2001. Congener-specific characterization of PCDDs/PCDFs in atmospheric deposition: comparison of profiles among deposition, source, and environmental sink. *Chemosphere*, 45: 173–183.

- Rappe, C. 1994. Dioxin, patterns and source identification. *Anal. Chem.*, 348: 63–75.
- Ravindra, K., Sokhi, R. & Grieken, R. 2008. Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: Source attribution, emission factors and regulation. *Atmospheric Environment*, 42: 2895–2921.
- Richter, H. & Howard, J.B. 2000. Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons and their growth to soot – a review of chemical reaction pathways. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26: 565–608.
- Ruokojärvi, P., Asikainen, A., Tuppurainen, K. & Ruuskanen, J. 2004. Chemical inhibition of PCDD/F formation in incineration processes. *Science of the Total Environment*, 325: 83–94.
- Ruokojärvi, P., Ettala, M., Rahkonen, P., Tarhanen, J. & Ruuskanen, J. 1995a. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and -furans (PCDDs and PCDFs) in municipal waste landfill fires. *Chemosphere*, 30: 1697–1708.
- Ruokojärvi, P., Ruuskanen, J., Ettala, M., Rahkonen, P. & Tarhanen, J. 1995b. Formation of polyaromatic hydrocarbons and polychlorinated organic compounds in municipal waste landfill fires. *Chemosphere*, 31: 3899–3908.
- Saarinen, J. 2006. Energiajäte roihusi Lappeenrannassa. *Helsingin Sanomat* 17.5.2006.
- Safe, S. 1998. Hazard and Risk Assessment of Chemical Mixtures Using the Toxic Equivalency. *Environmental Health Perspectives Supplements*, 106, Number S4.
- Setälä, R. 2005. Kierrätysfirman rakennusjätökasan sammutus kestää useita päiviä. Saramäen omakotiasukkaita varoitettiin runsaasta savusta. *Turun Sanomat* 6.2.2005.
- SFS-EN 1948-1. Stationary source emissions. Determination of the mass concentration of PCDDs/PCDFs and dioxin-like PCBs. Part 1: Sampling of PCDDs/PCDFs. Suomen Standardisoimisliitto SFS, 18.4.2006.
- Shin, D., Choi, S., Oh, J.-E. & Chang Y.-O. 1999. Evaluation of Polychlorinated Dibenzop-dioxin/Dibenzofuran (PCDD/F) Emission in Municipal Solid Waste Incinerators. *Environ. Sci. Technol.*, 33: 2657–2666.
- STM 461/2000. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista. Helsinki 19.5.2000.

SYKE, Suomen ympäristökeskus: Jätteen loppusijoittaminen kaatopaikalle (WWW-sivu). <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=226768&lan=FI> (viitattu 15.9.2008).

Thomas, V. & McCreight, C. 2008. Relation of chlorine, copper and sulphur to dioxin emission factors. *Journal of Hazardous Materials*, 151: 164–170.

Tuppurainen, K., Asikainen, A., Ruokojärvi, P. & Ruuskanen, J. 2003. Perspectives on the Formation of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans during Municipal Solid Waste (MSW) Incineration and Other Combustion Processes. *Acc. Chem. Res.*, 36: 652–658.

UNECE. 1998. United Nations Economic Commission for Europe, Protocol on Persistent Organic Pollutants (POPs), The 1998 Aarhus Protocol on Persistent Organic Pollutants (POPs).

UNEP. (WWW-sivusto). [http://www.pops.int/documents/convtext/convtext\\_en.pdf](http://www.pops.int/documents/convtext/convtext_en.pdf) (viitattu 1.10.2008).

UNEP. 1999. United nations environment programme, dioxin and furan inventories. National and Regional Emissions of PCDD/PCDF. UNEP Chemicals, Geneva, Switzerland.

USDHHS. Report on Carcinogens, Eleventh Edition; U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, National Toxicology Program. <http://ntp.niehs.nih.gov/index.cfm?objectid=32BA9724-F1F6-975E-7FCE50709CB4C932> (WWW-sivusto), (viitattu 13.10.2008).

USFA, U.S. Fire Administration. 2002. Landfill fires, their magnitude, characteristics, and mitigation. FA-225. Federal Emergency Management Agency, United States Fire Administration, National Fire Data Center.

Van den Berg, M., Birnbaum, L.S., Denison, M., De Vito, M., Farland, W., Feeley, M., Fiedler, H., Hakansson, H., Hanberg, A., Haws, L., Rose, M., Safe, S., Schrenk, D., Tohyama, C., Tritscher, A, Tuomisto, J., Tysklind, M., Walker, N. & Peterson R.E. 2006. The 2005 World Health Organization reevaluation of human and Mammalian toxic equivalency factors for dioxins and dioxin-like compounds. *Toxicological Sciences*, 93: 223–241.

Wevers, M., De Fré, R. & Desmedt, M. 2004. Effect of backyard burning on dioxin deposition and air concentrations. *Chemosphere*, 54: 1351–1356.

WHO. 2000. Air Quality Guidelines for Europe. World Health Organization, WHO Regional Publications, European Series, No. 91, Second Edition.

Wichmann, H., Kolb, M., Jopke, P., Schmidt, C., Alawi, M. & Bahadir, M. 2006. Assessment of the environmental impact of landfill sites with open combustion located in arid regions by combined chemical and ecotoxicological studies. *Chemosphere*, 65: 1778–1783.

YTV, Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta. 2004. Pääkaupunkiseudun kotitalouksien sekajätteen määrä ja laatu. Pääkaupunkiseudun julkaisusarja B 2004:13.

Øygaard, J.K., Måge, A., Gjengedal, E. & Svane, T. 2005. Effect of an uncontrolled fire and the subsequent fire fight on the chemical composition of landfill leachate. *Waste Management*, 25: 712–718.





# Liite A: Kyselytutkimuksen kaavakkeet

## Jätealan toimijoille osoitettu kyselykaavake

JÄTELAITOSTEN PALOTURVALLISUUS-hanke  
KYSELYKARTOITUS

23.5.2008  
1(4)

### TAUSTATIEDOT

Täyttäjän nimi ja asema: \_\_\_\_\_

Laitoksen nimi ja kunta: \_\_\_\_\_

Laitoksen toiminnan aloitusvuosi: \_\_\_\_\_

Alueen laajuus mukaan lukien varastorakennukset ym. (m<sup>2</sup>): \_\_\_\_\_

Laitoksen työntekijöiden lukumäärä: \_\_\_\_\_

Kuinka monta henkilöä työskentelee laitoksen alueella yleensä samanaikaisesti? \_\_\_\_\_

Onko samalla alueella myös muita jätealan toimijoita? \_\_\_\_\_

Mitä nämä muut toimijat ovat? \_\_\_\_\_

Tässä kyselykartoituksessa tarkastellaan tilannetta koko jätelaitosalueen kannalta eli myös muiden alueella toimivien yritysten toiminta on sen kannalta merkityksellistä. Voitte vastata tähän kyselyyn kartoittaen tilanteen koko alueen kannalta (myös muut toimijat huomioon ottaen) tai vain oman yrityksenne toimintaa arvioiden. Merkitkää rastilla kumpaa lähestymistapaa käytätte:

Vastaukseni koskevat:  koko aluetta  omaa laitosta

Laitos toimii pääasiallisesti jätteen

- vastaanottopisteenä
- lajittelijana
- uudelleenjalostajana
- loppusijoituspaikkana

Laitoksella käsiteltävät ja/tai varastoitavat jätelajit

- ongelmajätteet
- paperi
- kartonki
- pahvi
- rakennusjäte
- asbesti
- kiviaines
- puu
- puutarhajäte
- muovi
- energiajäte
- biojäte
- lasi
- sähkö- ja elektroniikkaromu (SER)
- metalli
- autonrenkaat
- sekajäte
- muu
- Mikä? \_\_\_\_\_

Nimeä laitoksenne kolme yleisintä jätelajia ja arvioi kuinka suuri on niiden kiertonopeus vastaanotosta loppusijoitukseen tai jatkokäsittelyyn lähettämiseen? (vrk, vk, kk)

**ENNALTAEHKÄISY JA VARAUTUMINEN, SUOJAUTUMISKEINOT**

Laitoksella on tulipalon syttymisen varalta	Kyllä	Ei
Vain alkusammutuskalusto (käsiammuttimet, palopostit yms.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Automaattinen paloilmoitinjärjestelmä	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Automaattinen sammutusjärjestelmä	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kipinäilmaisimia	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Liekkivahteja	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Valvontakameroita	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tehdaspalokunta	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Varauduttu sammutusvesien talteenottoon	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kirjalliset ohjeet miten toimitaan tulipalon syttyessä ja pelastussuunnitelma	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Järjestetty henkilökunnalle koulutusta, miten toimia tulipalotilanteessa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Järjestetty pelastusharjoituksia	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tehty yhteistyötä pelastuslaitoksen kanssa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Jos käytössä on hälytys- ja/tai sammutusjärjestelmä, mitä tiloja tai laitteita sillä on suojattu?

Jos käytössä on sammutusjärjestelmä, mikä on sen sammutusaine (vesi/hiilidioksidi/jauhe/muu)?

Mikäli haluat, kuvaile järjestettyjä pelastusharjoituksia tarkemmin.

Millaista yhteistyötä pelastuslaitoksen kanssa on tehty?

Henkilökunnan käytettävissä olevat alkusammutusvälineet ja -menetelmät.

Henkilökunnan käytettävissä olevat suojarusteet.

---

Millaiset palot pystytään tyypillisesti sammuttamaan itse?

---

Mikä aiheuttaa mielestäsi suurimman paloriskin laitoksellanne?

---

Miten riskiä on pyritty pienentämään?

---

Mitkä ovat tulipalon suurimmat vaaratekijät henkilökunnan, lähialueen asukkaiden tai ympäristön kannalta?

---

Kuvaile pahin mahdollinen tulipalotilanne laitoksellanne ja sen mahdolliset seuraukset.

---

### JÄTTEENKÄSITTELYLAITOSTEN PALOTURVALLISUUS SUOMESSA

Mikä on mielestäsi yleisin syttymissy jätteenkäsittelylaitosten tulipaloissa Suomessa?

---

Mitkä ovat jätteenkäsittelylaitosten paloturvallisuuteen liittyvät suurimmat riskitekijät?

---

Millä tasolla jätteenkäsittelylaitosten paloturvallisuus on yleisesti Suomessa?

---

Miten sitä voitaisiin parantaa?

---

### TAPAHTUNEET TULIPALOT

Kuinka monta tulipaloa tai syttymää laitoksellanne on ollut viimeisen 5 vuoden aikana?

---

Kuinka monta paloa sammutettiin henkilökunnan toimesta?

---

Kuinka monen sammuttamiseen tarvittiin pelastuslaitoksen apua?

---

Raportoidaanko laitoksellanne syttyneet tulipalot yrityksen sisäisesti tai muille tahoille?

---

Kuvaile lyhyesti merkittäviä ympäristövaikutuksia (esimerkiksi huomattava savuhaitta ympäristölle tai myrkyllisen sammutusveden päästö maaperään/pohjaveteen) aiheuttaneita tulipaloja. Tutkimuksen kannalta hyödyllisiä tietoja ovat mm.

- tapahtuma-aika (pp.kk.vvvv) ja kunta
- palanut jättemateriaali
- syttymissy, jos tiedossa (esim. tuhka, liuotin, öljy, virheellinen varastointitapa tai sijoituspaikka, tekninen syy [kone- tai laitevika tms.], tuhopoltto, inhimillinen erehdys [virheellinen toiminta, huolimattomuus tms.], muu syy; mikä)
- vahingot (henkilö/materiaali)
- palon koko (arvio pinta-alasta)
- palon kesto (t, vrk, vk, kk)
- syttymispaikka (halli, ulkotila, tms.)
- palon syvyys (m), mikäli kyse suuren jätekasan ns. pinta- tai syväpalosta
- käytetty alkusammutusväline
- palaneen jätteen säilytysaika ennen tulipaloa (vrk, vk, kk, a)
- miten palanut jäte käsiteltiin ja sijoitettiin?

---

#### YHTEYSTIEDOT

Voimmeko ottaa yhteyttä, mikäli olisimme kiinnostuneita saamaan tarkennuksia joihinkin vastauksiinne?

Kyllä	Ei
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

puhelinnumero: \_\_\_\_\_

Sähköpostiosoite: \_\_\_\_\_

## Pelastuslaitoksille osoitettu kyselykaavake

JÄTELAITOSTEN PALOTURVALLISUUS-hanke  
KYSELYKARTOITUS

23.5.2008  
1(1)

### TAUSTATIEDOT

Täyttäjän nimi ja asema:

---

Pelastuslaitos:

---

### TULIPALOT

Kuinka monta vakavaa jätteenkäsittelylaitoksen tulipaloa pelastuslaitoksenne alueella on ollut vuoden 2004 alun jälkeen?

---

Kuvailekaa lyhyesti vakavia tulipaloja (pvm, kunta, palanut jättemateriaali, syttymissyy, vahingot, palon koko ja kesto, mahdolliset ongelmat sammutuksessa).

---

### JÄTTEENKÄSITTELYLAITOSTEN PALOTURVALLISUUS SUOMESSA

Tehdäänkö jätteenkäsittelylaitosten kanssa yhteistyötä?

---

Millaista yhteistyötä jätteenkäsittelylaitosten kanssa on tehty?

---

Mitkä ovat mielestänne jätteenkäsittelylaitosten suurimmat paloturvallisuusongelmat?

---

Millä tasolla mielestänne jätteenkäsittelylaitosten paloturvallisuus on yleisesti Suomessa?

---

Millainen jätepallo on pelastuslaitoksen kannalta suurin uhka?

---

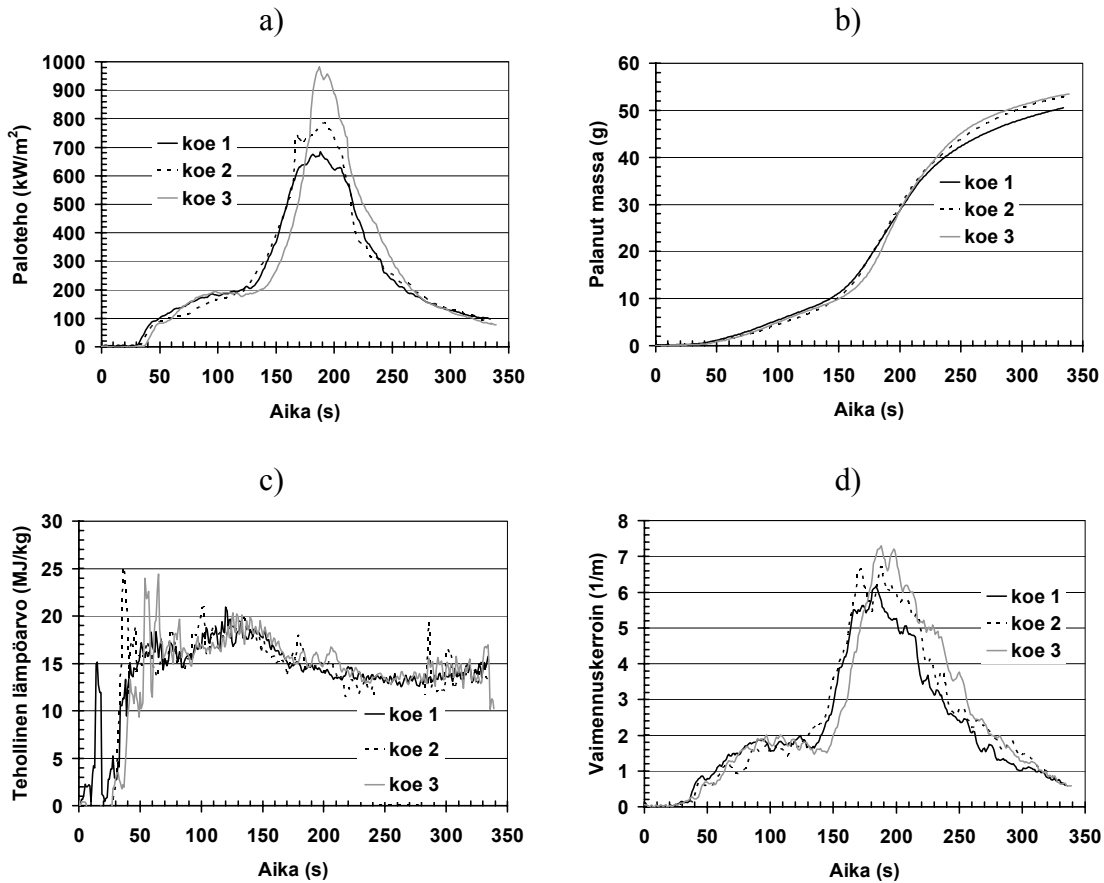
Mitkä ovat tyypillisiä sammuttamisongelmia?

---

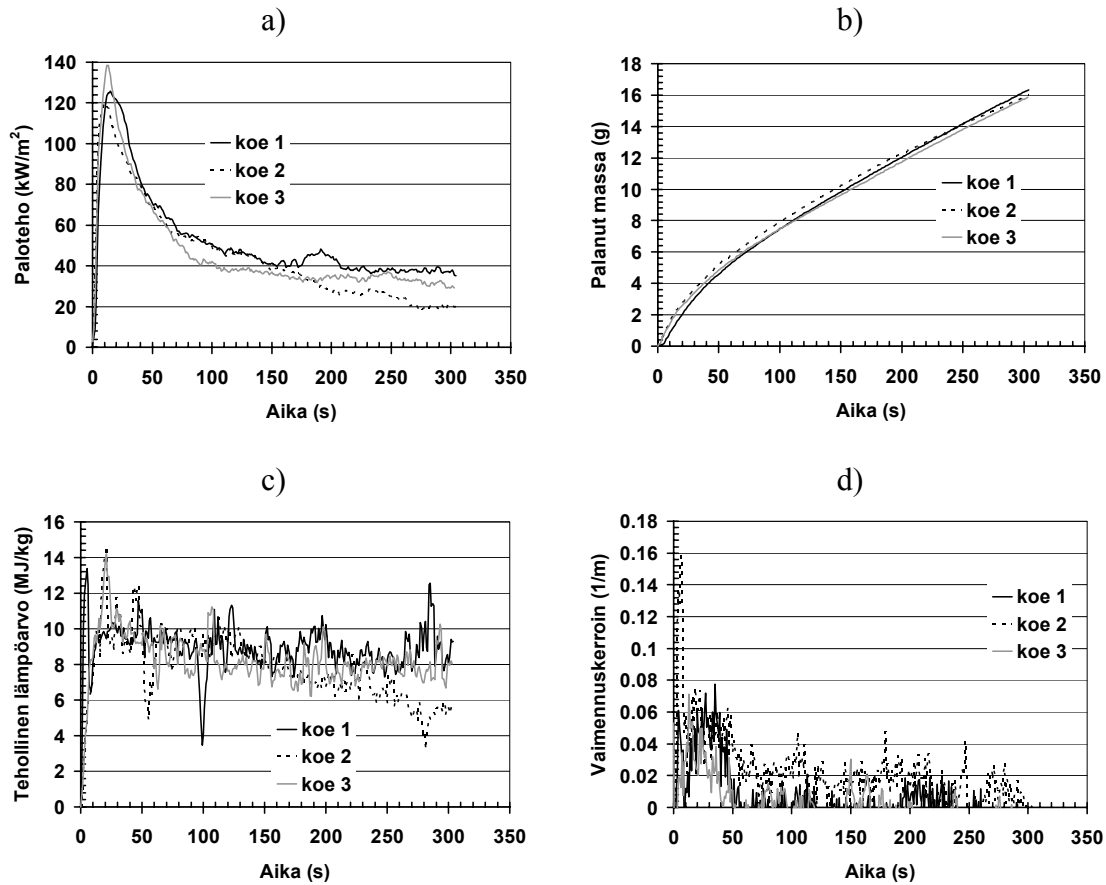


## Liite B: Kartiokalorimetrikokeiden tulokset rinnakkaisnäytteille

Kuvissa B1–B6 esitetään kolmen rinnakkaisen kartiokalorimetrikokeen tulokset yksittäisille jätejakeille. Tuloskuviissa esitetään paloteho ( $\text{kW/m}^2$ ), palanut massa (g), tehollinen lämpöarvo ( $\text{MJ/kg}$ ) sekä vaimennuskerroin ( $1/\text{m}$ ).

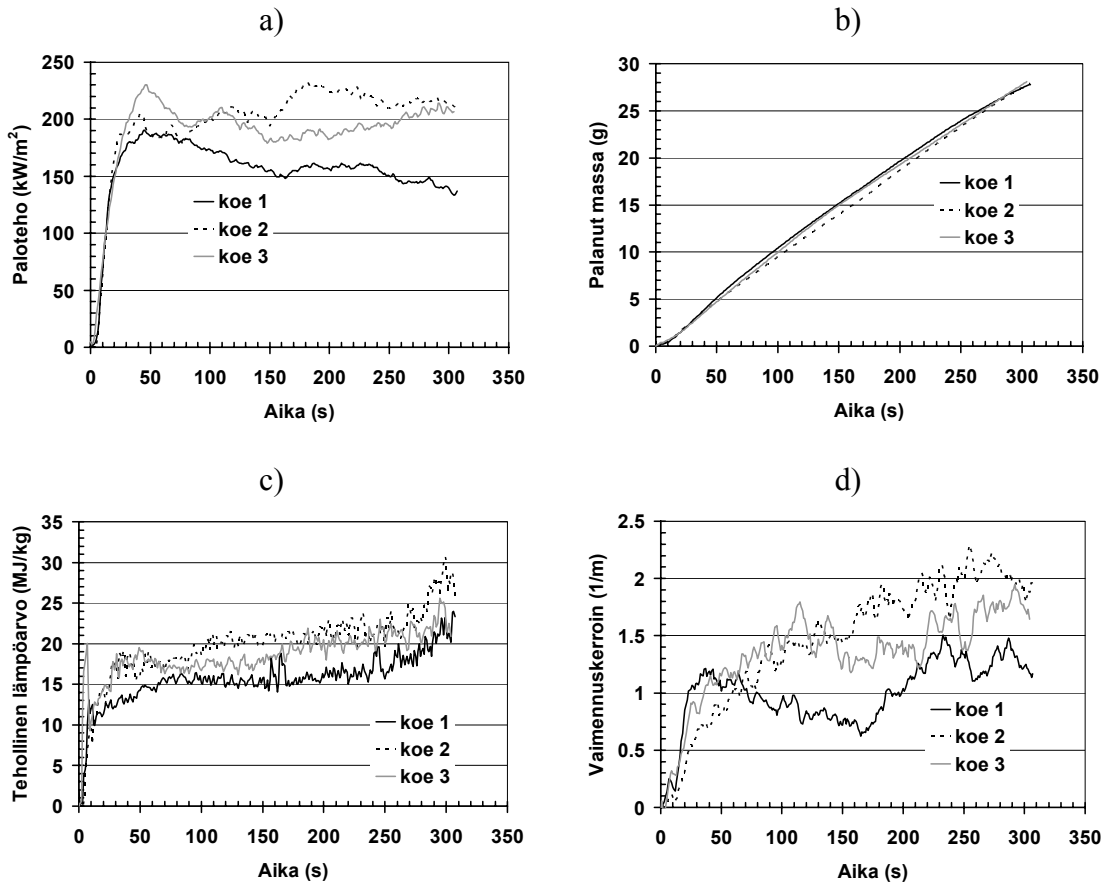


Kuva B1. PET-murskalle tehtyjen kolmen kartiokalorimetrikokeen tulokset a) paloteholle, b) palaneen massan määrälle, c) teholliselle lämpöarvolle ja d) vaimennuskerroin (1/m). Ajan nollakohta on se hetki, kun näyte on altistettu  $50 \text{ kW/m}^2$ :n lämpösäteilylle.

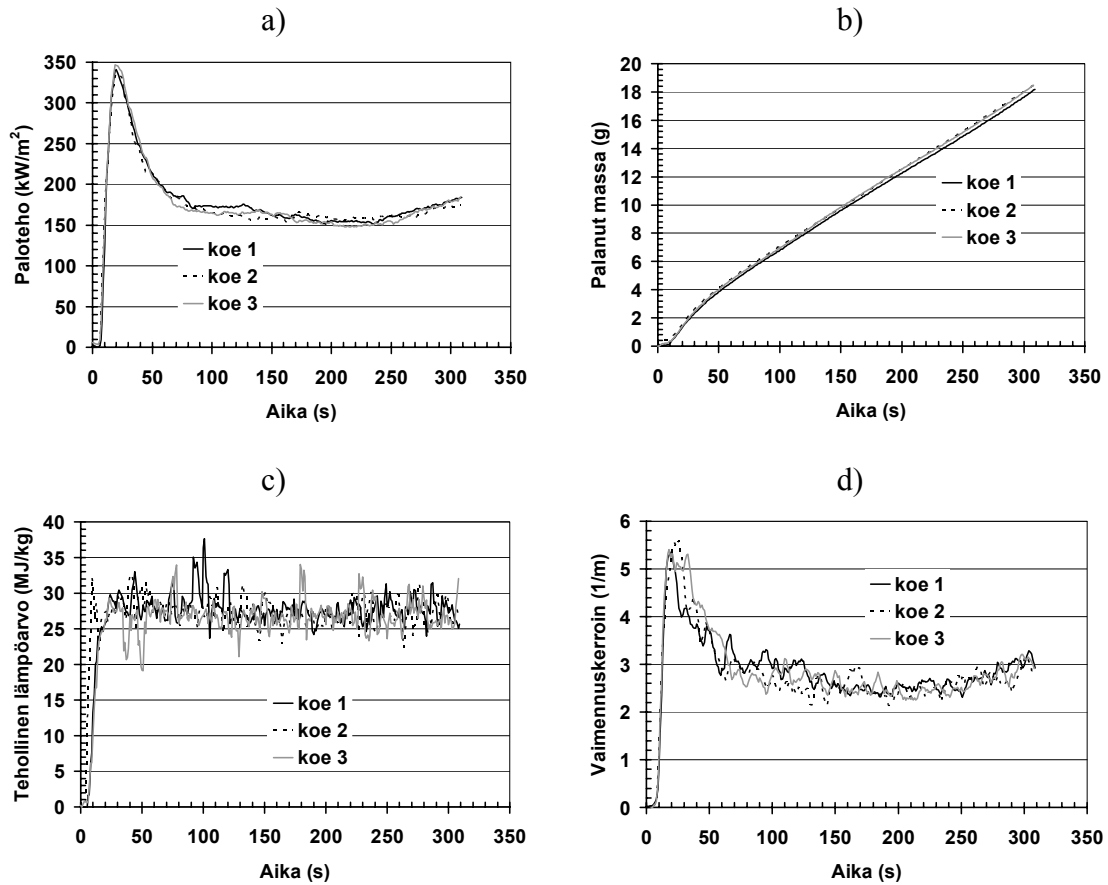


Kuva B2. Paperisilpulle tehtyjen kolmen kartiokalorimetrikokeen tulokset a) paloteholle, b) palaneen massan määrälle, c) teholliselle lämpöarvolle ja d) vaimennuskertoimelle. Ajan nollakohta on se hetki, kun näyte on altistettu  $50 \text{ kW/m}^2$ :n lämpösäteilylle.

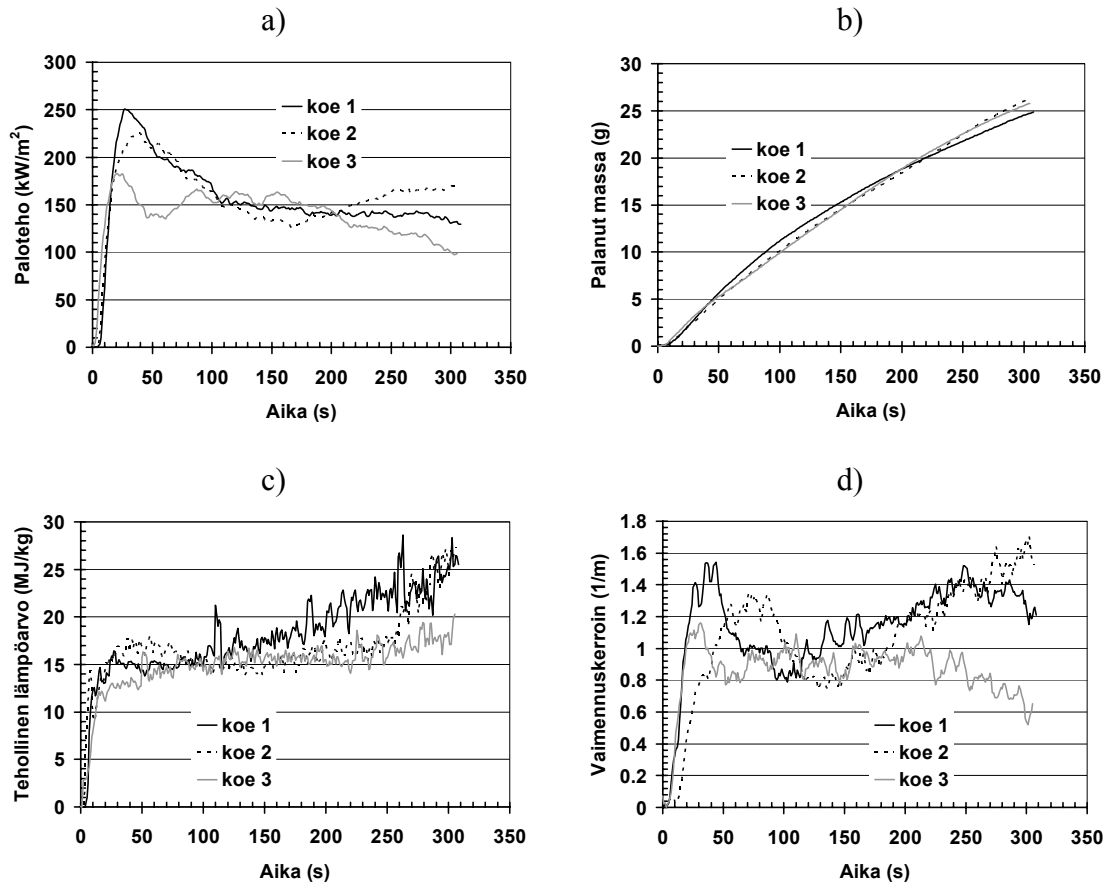




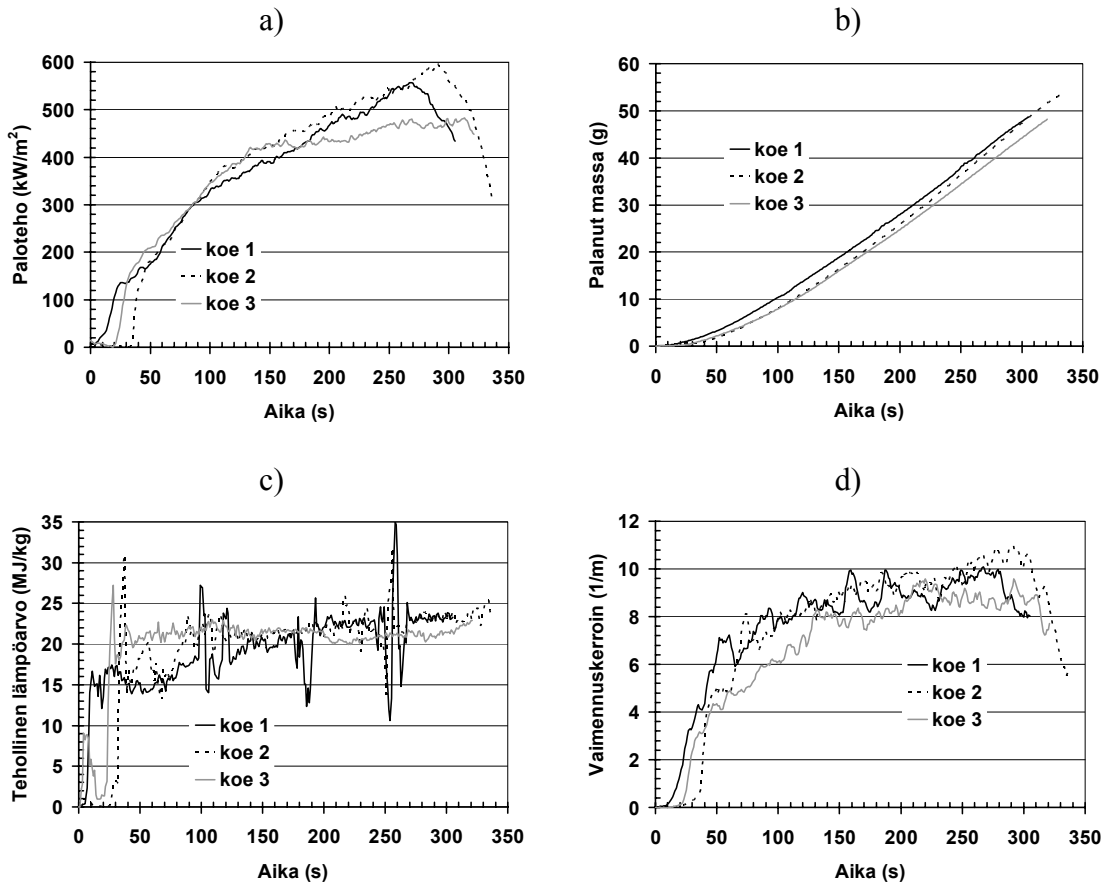
Kuva B3. Energiajätteelle tehtyjen kolmen kartiokalorimetrikokeen tulokset a) paloteholle, b) palaneen massan määrälle, c) teholliselle lämpöarvolle ja d) vaimennuskertoimelle. Ajan nollakohta on se hetki, kun näyte on altistettu  $50 \text{ kW/m}^2$ :n lämpösäteilylle.



Kuva B4. Rengasmurskalle tehtyjen kolmen kartiokalorimetrikokeen tulokset a) paloteholle, b) palaneen massan määrälle, c) teholliselle lämpöarvolle ja d) vaimennuskertoimelle. Ajan nollakohta on se hetki, kun näyte on altistettu  $50 \text{ kW/m}^2$ :n lämpösäteilylle.



Kuva B5. Yhdyskuntajätteelle tehtyjen kolmen kartiokalorimetrikokeen tulokset a) paloteholla, b) palaneen massan määrälle, c) teholliselle lämpöarvolle ja d) vaimennuskertoimelle. Ajan nollakohta on se hetki, kun näyte on altistettu 50 kW/m<sup>2</sup>:n lämpösäteilylle.



Kuva B6. SER-murskalle tehtyjen kolmen kartiokalorimetrikokeen tulokset a) paloteholle, b) palaneen massan määrälle, c) teholliselle lämpöarvolle ja d) vaimennuskertoimelle. Ajan nollakohta on se hetki, kun näyte on altistettu 50 kW/m<sup>2</sup>:n lämpösäteilylle.

# Liite C: Paloteknisten mittausten kuvaus suuren mittakaavan kokeissa

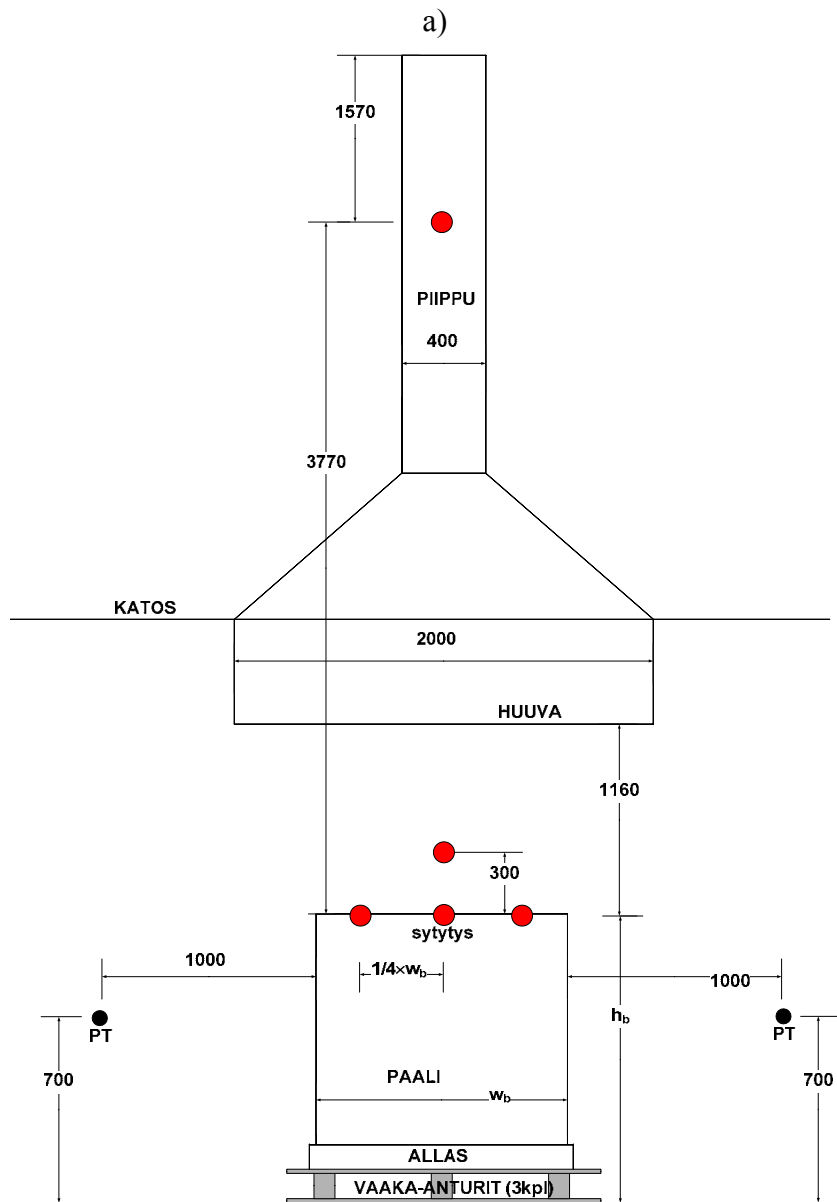
## Kuution kokeet

Kuution kokeiden eli yksittäisten paalien polttokokeissa käytettiin kuvan C1 kaltaista järjestelyä, jossa poltettavaksi tarkoitettu paali oli sijoitettu sammutusveden keräilyaltaan päälle. Paali sekä allas oli sijoitettu vaaka-antureiden päälle.

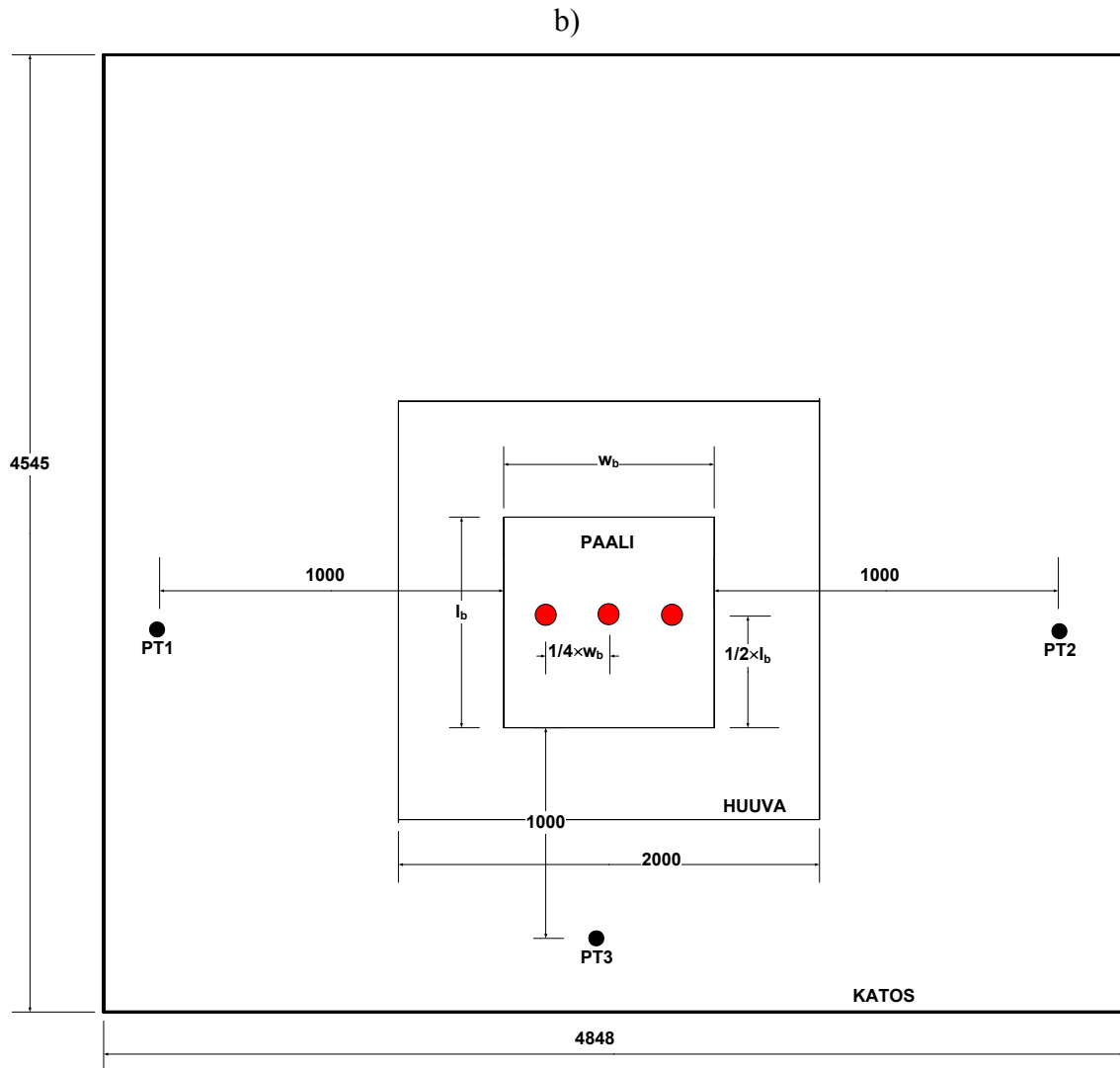
Lämpötiloja mitattiin kolmesta kohtaa paalin pinnasta, 300 mm:n etäisyydeltä paalin pinnasta sekä päästömittauslinjaston kohdalta savupiipun sisältä. Lämpötila-antureina käytettiin 0,5 mm:n K-typin termoparilankaa.

Lämpösäteilyä mitattiin paalien sivuilta 1 m:n päästä. Korkeussuunnassa mittauskohta asetettiin noin puoleenväliin paalia.

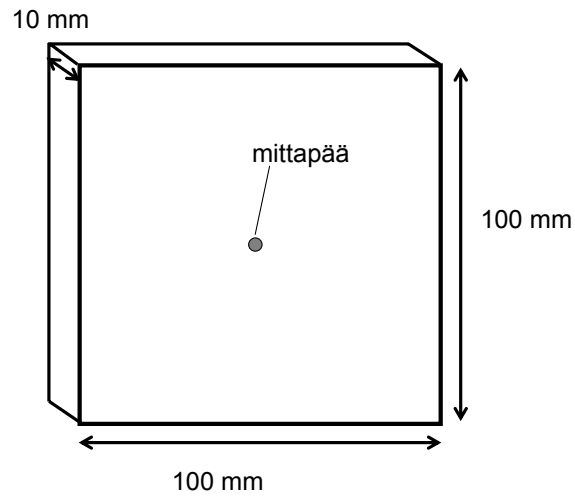
Lämpösäteilyn eli lämpövirrantiheyden mittaukseen käytettiin EN 1363-1:1999 – standardin mukaista ”plate thermometer” K-typin lämpötila-anturia (jatkossa käytetään nimitystä PT-anturi). PT-anturin dimensiot esitetään kuvassa C2. Anturi koostuu 0,7 mm paksusta metallikuoresta (Inconel 600 seos, tiheys  $8\,470\text{ kg/m}^3$ ), jonka takaosa on peitetty eristelevyllä (Kaowool, tiheys n.  $280\text{ kg/m}^3$ ). Metallikuoren ja eristelevyn välissä, levyn keskipisteessä, on K-typin termoparilanka, joka ilmoittaa levyn lämpötilan. Lämmönsiirtoyhtälöiden avulla lämpötilasta voidaan johtaa anturiin kohdistuva lämpösäteily (Ingason & Wickström 2007).



Kuva C1. (jatkuu)



Kuva C1. Kuution kokeiden kuvaus a) sivusta ja b) ylhäältä. Kuvien mitat millimetreissä (mm). Mustalla esitetty (PT) lämpösäteilyn ja punaisella lämpötilan mittauspisteet. Taulukossa 12 on esitetty aiemmin paalien dimensiot.



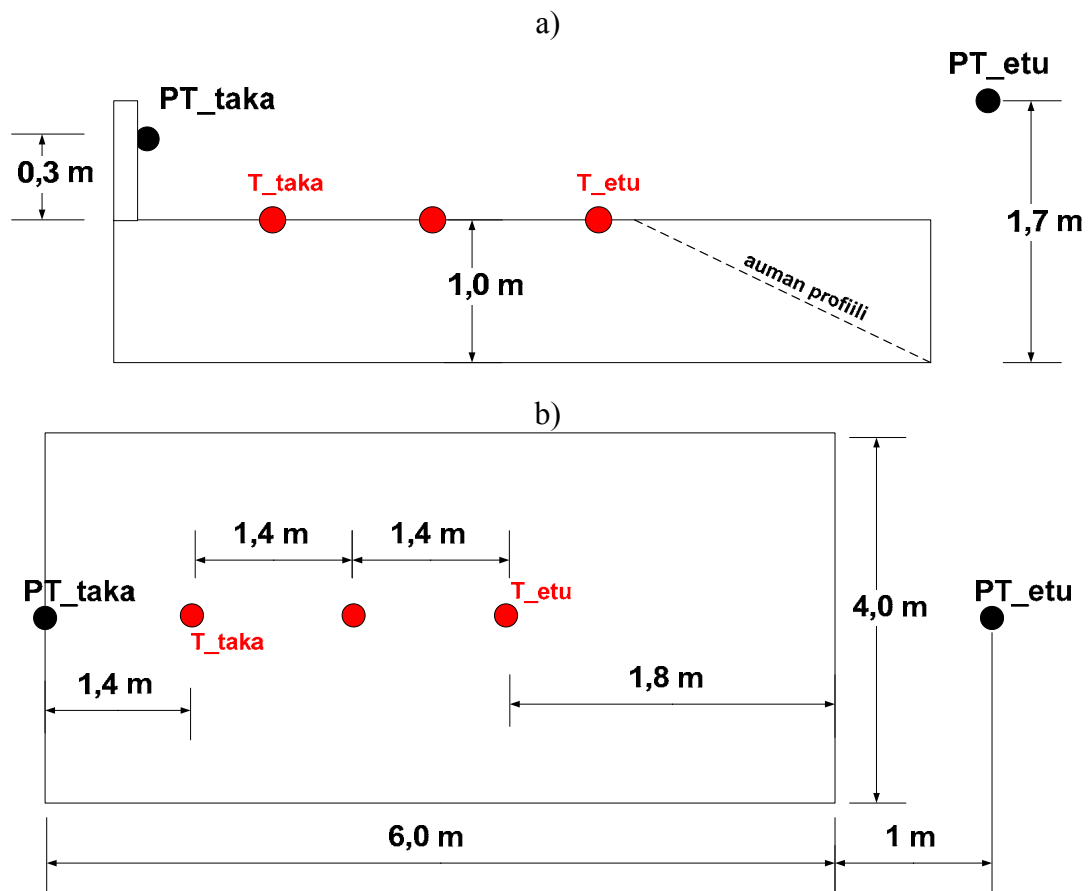
*Kuva C2. "Plate thermometer" lämpötila-anturin dimensiot.*

## **Energiajaeauma ja paperipaalirivit**

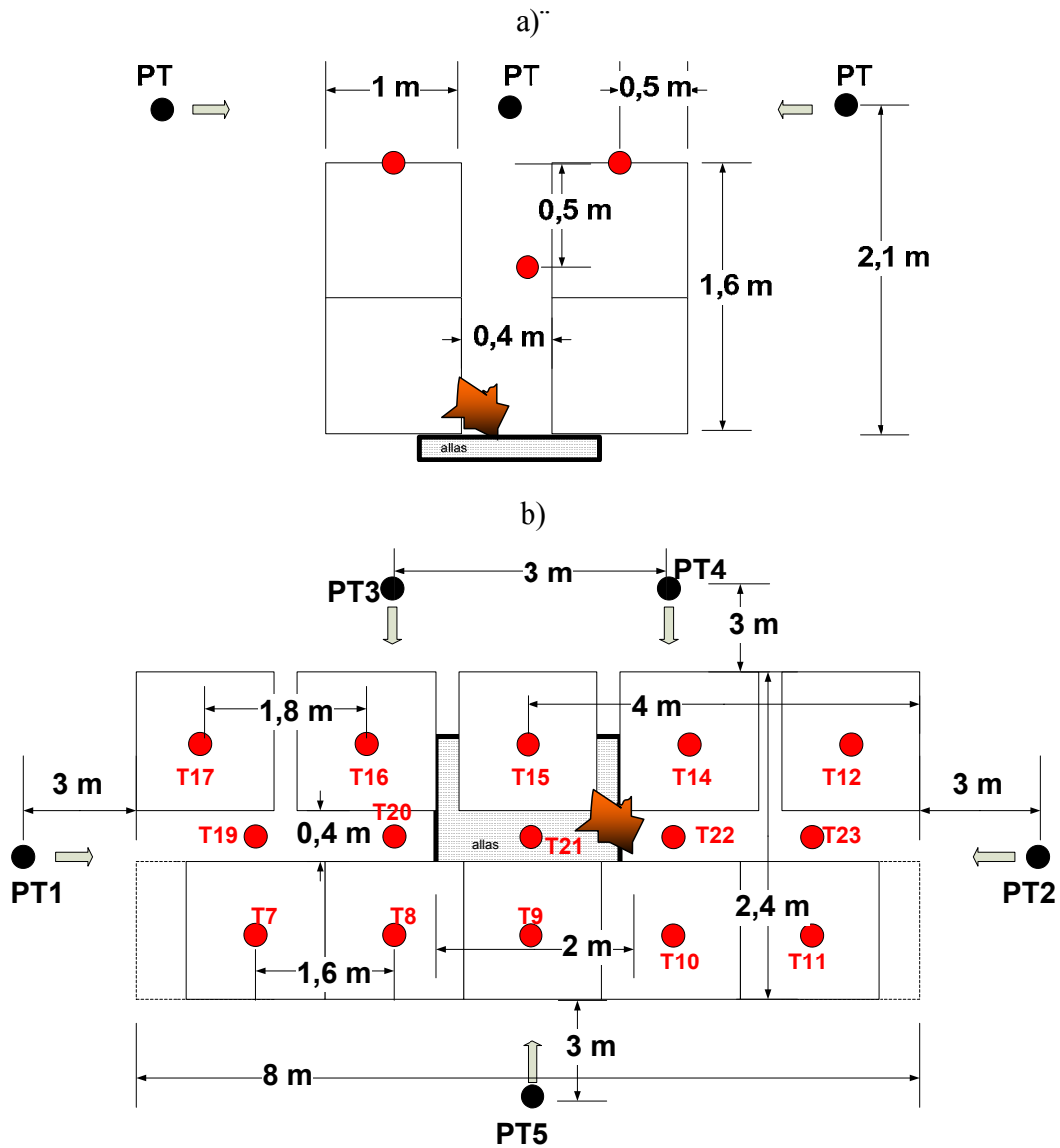
Energiajaeauman ja paperipaalirivistön polttokokeissa käytettiin lämpötila- ja PT-antureita, joilla, kuution kokeiden tapaan, pyrittiin arvioimaan palon leviämistä hieman suuremmassa mittakaavassa. Vaaka-antureita ei näissä kokeissa käytetty.

Kuvissa C3 ja C4 esitetään mittauspisteet lämpötila- ja lämpösäteilymittauksille energiajakaasan (koe 4) sekä paperipaalirivien (koe 5) polttokokeissa.





Kuva C3. Polttokokeen 4 (energiajaeauma) kuvaus a) sivusta ja b) ylhäältä. Mustalla esitetty (PT) lämpösäteilyn ja punaisella lämpötilan mittauspisteet.



Kuva C4. Polttokokeen 5 (kaksi paperipaaliriviä) kuvaus a) sivusta ja b) ylhäältä. Mustalla esitetty (PT) lämpösäteilyn ja punaisella lämpötilan mittauspisteet. Paalirivistön sytytyskohta merkitty kuviin.

## Liitteen C lähdeluettelo

Ingason, H. & Wickström, U. 2007. Measuring incident radiant heat flux using plate thermometer. *Fire Safety Journal*, Vol. 42, s. 161–166.

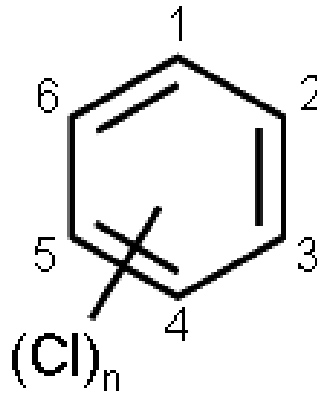
# Liite D: Savukaasu- ja sammutusvesinäytteistä analysoidut polyaromaattiset hiilivedyt (PAH), klooribentseenit, kloorifenolit, polyklooratut bifenyyliit (PCB), dioksiinit (PCDD) ja furaanit (PCDF)

Taulukko D1. Analysoidut PAH-yhdisteet.

1. Naftaleeni	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>				
2. Asenaftyleeni	C <sub>12</sub> H <sub>8</sub>		<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
3. Asenafteeni	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub>				
4. Fluoreeni	C <sub>13</sub> H <sub>10</sub>				
5. Fenantreeni	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>				
6. Antraseeni	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>				
7. Fluoranteeni	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>				
8. Pyreeni	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>				
9. Benzo(a)antraseeni	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>				
10. Kryseeni	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>				
11. Benzo(b)fluoranteeni	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>				
12. Benzo(k)fluoranteeni	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>				
13. Benzo(a)pyreeni	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>				
14. Indeno(1,2,3-cd)pyreeni	C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>				
15. Dibenzo(a,h)antraseeni	C <sub>22</sub> H <sub>14</sub>				
16. Benzo(g,h,i)peryleeni	C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>				

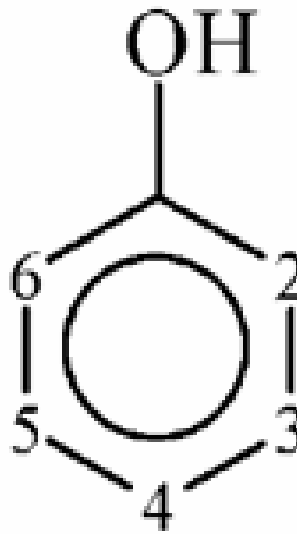
*Taulukko D2. Analysoidut klooribentseenit.*

1,3-Diklooribentseeni  
1,4-Diklooribentseeni  
1,2-Diklooribentseeni  
1,3,5-Triklooribentseeni  
1,2,4-Triklooribentseeni  
1,2,3-Triklooribentseeni  
1,2,3,4+1,2,3,5-Tetraklooribentseeni  
1,2,4,5-Tetraklooribentseeni  
Pentaklooribentseeni  
Heksaklooribentseeni



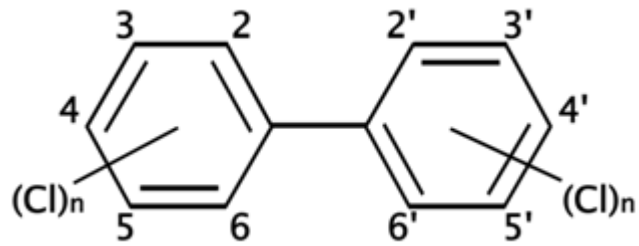
*Taulukko D3. Analysoidut kloorifenolit.*

2-Kloorifenoli  
3-Kloorifenoli  
4-Kloorifenoli  
2,6-Dikloorifenoli  
2,4+2,5-Dikloorifenoli  
3,4-Dikloorifenoli  
2,3-Dikloorifenoli  
3,5-Dikloorifenoli  
2,4,6-Trikloorifenoli  
2,3,6-Trikloorifenoli  
2,3,5-Trikloorifenoli  
2,4,5-Trikloorifenoli  
2,3,4-Trikloorifenoli  
3,4,5-Trikloorifenoli  
2,3,5,6-Tetrakloorifenoli  
2,3,4,6-Tetrakloorifenoli  
Pentakloorifenoli



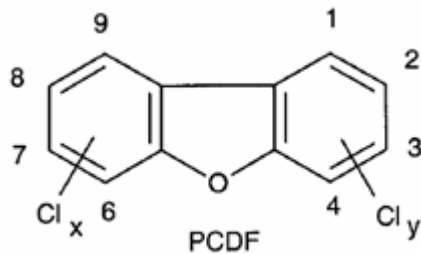
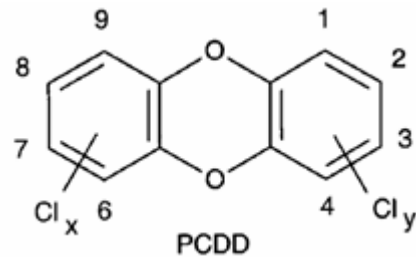
Taulukko D4. Analysoidut PCB-yhdisteet.

2,2',5-TCB  
 2,3,3'-TCB  
 2,4,4'-TCB  
 2,4',5-TCB  
 2,2',3,5'-TeCB  
 2,2',5,5'-TeCB  
 2,2',4,5,5'-PeCB  
 2,2',3,4',5',6-HxCB  
 2,3',4,4',5-PeCB  
 2,2',4,4',5,5'-HxCB  
 2,3,3',4,4'-PeCB  
 2,2',3,4,4',5'-HxCB  
 2,2',3,4,4',5,5'-HpCB  
 2,2',3,3',4,4',5-HpCB  
 2,2',3,3',4,4',5,5'-OcCB



Taulukko D5. Analysoidut PCDD- ja PCDF-yhdisteet.

2,3,7,8-TCDD  
 1,2,3,7,8-PeCDD  
 1,2,3,4,7,8-HxCDD  
 1,2,3,6,7,8-HxCDD  
 1,2,3,7,8,9-HxCDD  
 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD  
 OCDD  
 2,3,7,8-TCDF  
 1,2,3,7,8-PeCDF  
 2,3,4,7,8-PeCDF  
 1,2,3,4,7,8-HxCDF  
 1,2,3,6,7,8-HxCDF  
 2,3,4,6,7,8-HxCDF  
 1,2,3,7,8,9-HxCDF  
 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF  
 1,2,3,4,7,8,9-HpCDF  
 OCDF





# Liite E: Kartiokalometrikoiteiden ja suuren mittakaavan kokeiden analyysitulokset

Taulukko E1. Analysoidut PCDD- ja PCDF-yhdisteet.

## POLYAROMAATTISET HIILIVEDYT (PAH)

KAASUFAASI (ng/Nm <sup>3</sup> )	Kartiokalometrikoiteet					
	27.2.2008	27.2.2008	27.2.2008	27.2.2008	28.2.2008	28.2.2008
	PET	PAP	ENE	REN	YHD	SER
Naftaleeni	552694	73036	6803150	11928080	6309120	939581
Asenaftyleeni	60669	38690	414028	1113848	293669	161771
Asenaftteeni	13939	2062	2054	24359	878	14921
Fluoreeni	174051	80423	66481	261346	46169	1897
Fenantreeni	94713	99215	84288	189060	117419	4192
Antraseeni	5230	15996	14032	50668	25764	151148
Fluoranteeni	5483	588	1074	29619	2217	306624
Pyreeni	2422	0	364	28239	1139	164968
Benzo(a)antraseeni	2195	0	0	15346	0	105967
Kryseeni	5053	0	0	17986	0	79308
Benzo(b)fluoranteeni	6495	0	0	7324	0	67165
Benzo(k)fluoranteeni	3225	0	0	4329	0	16214
Benzo(a)pyreeni	1094	0	0	4664	0	99
Indeno(1,2,3-cd)pyreeni	0	0	0	838	0	7126
Dibenzo(a,h)antraseeni	0	0	0	114	0	3460
Benzo(g,h,i)peryleeni	0	0	0	1012	0	3432
<b>Yhteensä</b>	<b>927263</b>	<b>310011</b>	<b>7385472</b>	<b>13676831</b>	<b>6796376</b>	<b>2027873</b>

## HIUKKASFAASI (ng/Nm<sup>3</sup>)

Naftaleeni	3055	961	3304	12638	2371	61225
Asenaftyleeni	3959	0	465	931	234	6970
Asenaftteeni	0	0	0	0	0	1847
Fluoreeni	1094	247	270	583	1112	9407
Fenantreeni	4819	0	3053	9536	2392	69204
Antraseeni	1240	0	1451	7117	884	23099
Fluoranteeni	1549	0	2242	5569	1326	37565
Pyreeni	417	0	1464	5180	757	19781
Benzo(a)antraseeni	1720	0	5239	18864	3423	105590
Kryseeni	3251	0	6752	17959	2847	109775
Benzo(b)fluoranteeni	3776	0	4158	17249	2586	184152
Benzo(k)fluoranteeni	2081	0	3235	16766	3765	49821
Benzo(a)pyreeni	1062	0	6174	26429	3885	83642
Indeno(1,2,3-cd)pyreeni	6539	0	14805	49267	5486	120873
Dibenzo(a,h)antraseeni	3225	0	1577	9415	596	40691
Benzo(g,h,i)peryleeni	4357	0	10439	39503	5098	49608
<b>Yhteensä</b>	<b>42145</b>	<b>1208</b>	<b>64628</b>	<b>237007</b>	<b>36764</b>	<b>973252</b>

## kaasu+hiukkaset (ng/Nm<sup>3</sup>)

Naftaleeni	555748	73997	6806454	11940719	6311491	1000806
Asenaftyleeni	64628	38690	414493	1114780	293904	168741
Asenaftteeni	13939	2062	2054	24359	878	16768
Fluoreeni	175145	80670	66751	261929	47281	11304
Fenantreeni	99532	99215	87341	198596	119811	73396
Antraseeni	6470	15996	15483	57784	26648	174247
Fluoranteeni	7033	588	3316	35188	3544	344189
Pyreeni	2840	0	1828	33419	1896	184749
Benzo(a)antraseeni	3915	0	5239	34209	3423	211556
Kryseeni	8304	0	6752	35945	2847	189083
Benzo(b)fluoranteeni	10271	0	4158	24573	2586	251317
Benzo(k)fluoranteeni	5306	0	3235	21095	3765	66035
Benzo(a)pyreeni	2157	0	6174	31093	3885	83742
Indeno(1,2,3-cd)pyreeni	6539	0	14805	50105	5486	128000
Dibenzo(a,h)antraseeni	3225	0	1577	9529	596	44152
Benzo(g,h,i)peryleeni	4357	0	10439	40515	5098	53040
<b>Yhteensä</b>	<b>969408</b>	<b>311219</b>	<b>7450100</b>	<b>13913837</b>	<b>6833140</b>	<b>3001125</b>

Taulukko E2. Kloorifenolien pitoisuudet kartiokolorimetrikokeissa.

**KLOORIFENOLIT**

KAASUFAASI (ng/Nm3)	Kartiokolorimetrikokeet						
	27.2.2008	27.2.2008	27.2.2008	27.2.2008	28.2.2008	28.2.2008	
	PET	PAP	ENE	REN	YHD	SER	
2-Kloorifenoli	278		449	3379	208	9888	46731
3-Kloorifenoli	152		25	251	40	596	7823
4-Kloorifenoli	82		152	1124	174	2365	7603
2,6-Dikloorifenoli	6		0	358	0	1373	2195
2,4+2,5-Dikloorifenoli	272		183	1275	121	2197	5002
3,4-Dikloorifenoli	0		0	0	0	7	64
2,3-Dikloorifenoli	0		0	0	0	87	391
3,5-Dikloorifenoli	0		0	0	0	0	377
2,4,6-Trikloorifenoli	32		25	383	54	1192	291
2,3,6-Trikloorifenoli	0		0	0	0	0	92
2,3,5-Trikloorifenoli	0		0	0	0	0	99
2,4,5-Trikloorifenoli	0		0	44	0	47	270
2,3,4-Trikloorifenoli	0		0	0	0	0	78
3,4,5-Trikloorifenoli	0		0	0	0	0	0
2,3,5,6-Tetrakloorifenoli	0		51	132	40	201	107
2,3,4,6-Tetrakloorifenoli	0		0	0	0	0	0
Pentakloorifenoli	0		19	6	7	7	21
<b>Yhteensä</b>	<b>822</b>		<b>904</b>	<b>6953</b>	<b>643</b>	<b>17960</b>	<b>71144</b>

**HIUKKASFAASI (ng/Nm3)**

2-Kloorifenoli	0	108	157	0	161	99
3-Kloorifenoli	0	0	0	0	0	57
4-Kloorifenoli	0	0	0	0	0	227
2,6-Dikloorifenoli	0	0	0	0	0	0
2,4+2,5-Dikloorifenoli	0	82	119	0	147	64
3,4-Dikloorifenoli	0	0	0	0	0	0
2,3-Dikloorifenoli	0	0	0	0	0	0
3,5-Dikloorifenoli	0	0	0	0	0	0
2,4,6-Trikloorifenoli	0	0	31	0	60	21
2,3,6-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0	0
2,3,5-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0	0
2,4,5-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0	0
2,3,4-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0	0
3,4,5-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0	0
2,3,5,6-Tetrakloorifenoli	0	63	13	0	20	7
2,3,4,6-Tetrakloorifenoli	0	0	0	0	0	0
Pentakloorifenoli	0	0	31	0	228	43
<b>Yhteensä</b>	<b>0</b>	<b>253</b>	<b>352</b>	<b>0</b>	<b>616</b>	<b>519</b>

**kaasu+hiukkaset (ng/Nm3)**

2-Kloorifenoli	278	557	3536	208	10048	46830
3-Kloorifenoli	152	25	251	40	596	7880
4-Kloorifenoli	82	152	1124	174	2365	7830
2,6-Dikloorifenoli	6	0	358	0	1373	2195
2,4+2,5-Dikloorifenoli	272	266	1394	121	2345	5066
3,4-Dikloorifenoli	0	0	0	0	7	64
2,3-Dikloorifenoli	0	0	0	0	87	391
3,5-Dikloorifenoli	0	0	0	0	0	377
2,4,6-Trikloorifenoli	32	25	415	54	1253	313
2,3,6-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0	92
2,3,5-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0	99
2,4,5-Trikloorifenoli	0	0	44	0	47	270
2,3,4-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0	78
3,4,5-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0	0
2,3,5,6-Tetrakloorifenoli	0	114	144	40	221	114
2,3,4,6-Tetrakloorifenoli	0	0	0	0	0	0
Pentakloorifenoli	0	19	38	7	234	64
<b>Yhteensä</b>	<b>822</b>	<b>1157</b>	<b>7305</b>	<b>643</b>	<b>18576</b>	<b>71663</b>



Taulukko E3. PCDD/F-yhdisteiden pitoisuudet kartiokolorimetrikokeissa.

**DIOKSIINIT JA FURAAINIT (PCDD/PCDF)**

KAASUFAASI (pg/Nm3)	Kartiokolorimetrikokeet						
	27.2.2008	27.2.2008	27.2.2008	27.2.2008	28.2.2008	28.2.2008	
	PET	PAP	ENE	REN	YHD	SER	
2,3,7,8-TCDD	0	0	0	0	0	0	50
1,2,3,7,8-PeCDD	0	0	0	0	0	0	7
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0	0	0	0	0	0	0
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0	0	0	0	0	0	0
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0	0	0	0	0	0	0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0	0	0	0	0	0	0
OCDD	0	0	0	0	0	0	0
2,3,7,8-TCDF	0	0	0	0	0	0	1954
1,2,3,7,8-PeCDF	0	0	0	0	0	0	1314
2,3,4,7,8-PeCDF	0	0	0	0	0	0	1201
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0	0	0	0	0	0	391
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0	0	0	0	0	0	462
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0	0	0	0	0	0	256
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0	0	0	0	0	0	107
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0	0	0	0	0	0	298
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0	0	0	0	0	0	0
OCDF	0	0	0	0	0	0	0
<b>Yhteensä</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>6039</b>

**HIUKKASFAASI (pg/Nm3)**

2,3,7,8-TCDD	0	0	0	0	0	0	14
1,2,3,7,8-PeCDD	0	0	0	0	0	0	43
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0	0	0	0	0	0	0
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0	0	0	0	0	0	0
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0	0	0	0	0	0	0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0	0	0	0	0	0	0
OCDD	0	0	0	0	0	0	0
2,3,7,8-TCDF	0	0	0	0	0	0	1386
1,2,3,7,8-PeCDF	0	0	0	0	0	0	2508
2,3,4,7,8-PeCDF	0	0	0	0	0	0	2977
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0	0	0	0	0	0	2323
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0	0	0	0	0	0	2878
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0	0	0	0	0	0	1428
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0	0	0	0	0	0	675
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0	0	0	0	0	0	3005
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0	0	0	0	0	0	1208
OCDF	0	0	0	0	0	0	838
<b>Yhteensä</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>19283</b>

**kaasu+hiukkaset (pg/Nm3)**

2,3,7,8-TCDD	0	0	0	0	0	0	64
1,2,3,7,8-PeCDD	0	0	0	0	0	0	50
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0	0	0	0	0	0	0
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0	0	0	0	0	0	0
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0	0	0	0	0	0	0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0	0	0	0	0	0	0
OCDD	0	0	0	0	0	0	0
2,3,7,8-TCDF	0	0	0	0	0	0	3339
1,2,3,7,8-PeCDF	0	0	0	0	0	0	3823
2,3,4,7,8-PeCDF	0	0	0	0	0	0	4178
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0	0	0	0	0	0	2714
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0	0	0	0	0	0	3339
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0	0	0	0	0	0	1684
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0	0	0	0	0	0	782
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0	0	0	0	0	0	3304
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0	0	0	0	0	0	1208
OCDF	0	0	0	0	0	0	838
<b>Yhteensä</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>25323</b>

Taulukko E4. PCDD/F-yhdisteiden pitoisuus toksisuusekvivalentteina (TEQ) kartiokolorimetrikokeissa.

**DIOKSIINIT JA FURAANIT TCDD-ekv.**

KAASUFAASI (pg TEQ/Nm3)	TEF-arvo (Nordic)	Kartiokolorimetrikokeet						
		27.2.2008 PET	27.2.2008 PAP	27.2.2008 ENE	27.2.2008 REN	28.2.2008 YHD	28.2.2008 SER	
2,3,7,8-TCDD	1	0	0	0	0	0	0	50
1,2,3,7,8-PeCDD	0.5	0	0	0	0	0	0	4
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1	0	0	0	0	0	0	0
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1	0	0	0	0	0	0	0
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1	0	0	0	0	0	0	0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.001	0	0	0	0	0	0	0
OCDD	0.001	0	0	0	0	0	0	0
2,3,7,8-TCDF	0.1	0	0	0	0	0	0	195
1,2,3,7,8-PeCDF	0.01	0	0	0	0	0	0	13
2,3,4,7,8-PeCDF	0.5	0	0	0	0	0	0	600
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.1	0	0	0	0	0	0	39
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1	0	0	0	0	0	0	46
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.1	0	0	0	0	0	0	26
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1	0	0	0	0	0	0	11
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.01	0	0	0	0	0	0	3
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.01	0	0	0	0	0	0	0
OCDF	0.001	0	0	0	0	0	0	0
<b>Yhteensä</b>			0	0	0	0	0	987
<b>HIUKKASFAASI (pg TEQ/Nm3)</b>								
2,3,7,8-TCDD	1	0	0	0	0	0	0	14
1,2,3,7,8-PeCDD	0.5	0	0	0	0	0	0	21
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1	0	0	0	0	0	0	0
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1	0	0	0	0	0	0	0
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1	0	0	0	0	0	0	0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.001	0	0	0	0	0	0	0
OCDD	0.001	0	0	0	0	0	0	0
2,3,7,8-TCDF	0.1	0	0	0	0	0	0	139
1,2,3,7,8-PeCDF	0.01	0	0	0	0	0	0	25
2,3,4,7,8-PeCDF	0.5	0	0	0	0	0	0	1489
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.1	0	0	0	0	0	0	232
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1	0	0	0	0	0	0	288
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.1	0	0	0	0	0	0	143
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1	0	0	0	0	0	0	67
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.01	0	0	0	0	0	0	30
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.01	0	0	0	0	0	0	12
OCDF	0.001	0	0	0	0	0	0	1
<b>Yhteensä</b>			0	0	0	0	0	2461
<b>kaasu+hiukkaset (pg TEQ/Nm3)</b>								
2,3,7,8-TCDD	1	0	0	0	0	0	0	64
1,2,3,7,8-PeCDD	0.5	0	0	0	0	0	0	25
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1	0	0	0	0	0	0	0
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1	0	0	0	0	0	0	0
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1	0	0	0	0	0	0	0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.001	0	0	0	0	0	0	0
OCDD	0.001	0	0	0	0	0	0	0
2,3,7,8-TCDF	0.1	0	0	0	0	0	0	334
1,2,3,7,8-PeCDF	0.01	0	0	0	0	0	0	38
2,3,4,7,8-PeCDF	0.5	0	0	0	0	0	0	2089
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.1	0	0	0	0	0	0	271
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1	0	0	0	0	0	0	334
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.1	0	0	0	0	0	0	168
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1	0	0	0	0	0	0	78
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.01	0	0	0	0	0	0	33
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.01	0	0	0	0	0	0	12
OCDF	0.001	0	0	0	0	0	0	1
<b>Yhteensä</b>			0	0	0	0	0	3448

Taulukko E5. PAH-yhdisteiden pitoisuudet kuution kokeissa.

**POLYAROMAATTISET HIILIVEDYT (PAH)**

KAASUFAASI (ng/Nm <sup>3</sup> )	Kuution kokeet				
	27.5.2008	27.5.2008	27.5.2008	28.5.2008	28.5.2008
	PAP, palo	REF, palo	REF, sammutus	REF, palo	REF, sammutus
Naftaleeni	58446	729665	862536	1202708	335262
Asenaftyleeni	5276	27512	35733	387123	23359
Asenaftteeni	2806	4892	10545	118630	11178
Fluoreeni	8215	1579	45045	626419	50000
Fenantreeni	16699	75014	130465	409593	102174
Antraseeni	2825	9211	24006	49660	11114
Fluoranteeni	3994	14617	27781	72904	14854
Pyreeni	1882	10837	22360	55099	10134
Benzo(a)antraseeni	201	2938	8512	4099	2363
Kryseeni	1282	6096	16161	9123	6011
Benzo(b)fluoranteeni	1279	3667	8684	4235	0
Benzo(k)fluoranteeni	393	2055	4913	2045	0
Benzo(a)pyreeni	107	1469	1533	1931	0
Indeno(1,2,3-cd)pyreeni	113	778	0	970	0
Dibenzo(a,h)antraseeni	50	199	0	340	0
Benzo(g,h,i)peryleeni	3	522	0	940	0
<b>Yhteensä</b>	<b>103571</b>	<b>891050</b>	<b>1198275</b>	<b>2945819</b>	<b>566449</b>

**HIUKKASFAASI (ng/Nm<sup>3</sup>)**

Naftaleeni	3018	967	1025	1259	1684
Asenaftyleeni	129	167	242	75	332
Asenaftteeni	1224	136	397	184	1593
Fluoreeni	451	347	787	747	2926
Fenantreeni	1312	538	2511	542	10487
Antraseeni	1067	105	559	96	2183
Fluoranteeni	1546	364	2254	229	6949
Pyreeni	1642	373	3110	229	6967
Benzo(a)antraseeni	743	545	4170	295	8590
Kryseeni	1144	950	8206	599	25137
Benzo(b)fluoranteeni	1301	2062	14252	1205	12448
Benzo(k)fluoranteeni	377	864	4215	419	3809
Benzo(a)pyreeni	605	1409	6354	801	5633
Indeno(1,2,3-cd)pyreeni	311	1605	3717	892	2342
Dibenzo(a,h)antraseeni	58	402	1206	310	1066
Benzo(g,h,i)peryleeni	319	1603	3698	1009	2838
<b>Yhteensä</b>	<b>15249</b>	<b>12438</b>	<b>56704</b>	<b>8892</b>	<b>94985</b>

**kaasu+hiukkaset (ng/Nm<sup>3</sup>)**

Naftaleeni	61464	730632	863561	1203967	336946
Asenaftyleeni	5406	27679	35976	387199	23691
Asenaftteeni	4030	5029	10943	118813	12771
Fluoreeni	8666	1926	45832	627166	52926
Fenantreeni	18011	75553	132976	410136	112661
Antraseeni	3893	9316	24565	49756	13298
Fluoranteeni	5541	14981	30035	73133	21803
Pyreeni	3524	11211	25470	55328	17101
Benzo(a)antraseeni	944	3483	12682	4395	10953
Kryseeni	2426	7045	24368	9723	31148
Benzo(b)fluoranteeni	2580	5730	22936	5440	12448
Benzo(k)fluoranteeni	770	2919	9128	2464	3809
Benzo(a)pyreeni	713	2878	7887	2732	5633
Indeno(1,2,3-cd)pyreeni	424	2383	3717	1861	2342
Dibenzo(a,h)antraseeni	107	600	1206	651	1066
Benzo(g,h,i)peryleeni	322	2124	3698	1949	2838
<b>Yhteensä</b>	<b>118820</b>	<b>903488</b>	<b>1254979</b>	<b>2954711</b>	<b>661434</b>

Taulukko E6. PAH-yhdisteiden pitoisuudet kenttäkokeissa.

**POLYAROMAATTISET HIILIVEDYT (PAH)**

KAASUFAASI (ng/Nm <sup>3</sup> )	Kenttäkokeet					
	3.6.2008	3.6.2008	3.6.2008	4.6.2008	4.6.2008	4.6.2008
	REF, palo	REF, sammutus	REF, kenttä	PAP, palo	PAP, sammutus	PAP, kenttä
Naftaleeni	785	412	172	1492	101	29
Asenaftyleeni	386	7495	377	174	3419	53
Asenafteeni	154	1132	85	137	743	10
Fluoreeni	1027	3939	637	340	1092	33
Fenantreeni	6234	11754	1293	535	1228	123
Antraseeni	81	2833	286	1461	2096	34
Fluoranteeni	521	1038	98	3373	7013	26
Pyreeni	487	901	64	3472	6909	32
Benzo(a)antraseeni	38	294	2	156	13	2
Kryseeni	68	355	4	159	13	2
Benzo(b)fluoranteeni	64	356	1	190	12	1
Benzo(k)fluoranteeni	28	154	0	68	4	0
Benzo(a)pyreeni	18	248	1	140	9	0
Indeno(1,2,3-cd)pyreeni	0	115	0	73	4	0
Dibenzo(a,h)antraseeni	0	28	0	12	0	0
Benzo(g,h,i)peryleeni	9	114	0	82	4	0
<b>Yhteensä</b>	<b>9898</b>	<b>31166</b>	<b>3021</b>	<b>11866</b>	<b>22660</b>	<b>344</b>

**HIUKKASFAASI (ng/Nm<sup>3</sup>)**

Naftaleeni	33	103	7	18	23	4
Asenaftyleeni	199	1831	4	121	4	0
Asenafteeni	156	758	29	50	59	0
Fluoreeni	639	3626	6	281	9	0
Fenantreeni	3247	15748	97	16208	293	17
Antraseeni	57	17742	31	5560	92	5
Fluoranteeni	1849	5963	181	10324	1285	9
Pyreeni	1881	5835	186	13790	1852	13
Benzo(a)antraseeni	543	2230	90	2205	566	6
Kryseeni	1036	2874	151	2282	592	8
Benzo(b)fluoranteeni	1087	3015	61	3156	677	17
Benzo(k)fluoranteeni	792	1028	36	1408	235	6
Benzo(a)pyreeni	482	2365	54	3148	475	5
Indeno(1,2,3-cd)pyreeni	25	111	25	106	231	7
Dibenzo(a,h)antraseeni	78	224	8	243	42	1
Benzo(g,h,i)peryleeni	247	95	28	1647	252	7
<b>Yhteensä</b>	<b>12351</b>	<b>63548</b>	<b>994</b>	<b>60546</b>	<b>6688</b>	<b>106</b>

**kaasu+hiukkaset (ng/Nm<sup>3</sup>)**

Naftaleeni	818	515	179	1510	124	33
Asenaftyleeni	585	9326	381	295	3423	53
Asenafteeni	310	1890	114	187	802	10
Fluoreeni	1665	7565	643	620	1100	33
Fenantreeni	9481	27502	1390	16744	1521	139
Antraseeni	138	20575	316	7022	2187	39
Fluoranteeni	2371	7001	279	13697	8298	35
Pyreeni	2368	6736	250	17262	8762	45
Benzo(a)antraseeni	581	2524	92	2361	579	8
Kryseeni	1104	3229	155	2441	605	11
Benzo(b)fluoranteeni	1151	3371	62	3346	689	18
Benzo(k)fluoranteeni	821	1182	37	1476	240	6
Benzo(a)pyreeni	500	2613	55	3287	484	5
Indeno(1,2,3-cd)pyreeni	25	226	25	179	235	7
Dibenzo(a,h)antraseeni	78	252	8	255	42	1
Benzo(g,h,i)peryleeni	257	208	28	1729	256	7
<b>Yhteensä</b>	<b>22249</b>	<b>94714</b>	<b>4014</b>	<b>72412</b>	<b>29348</b>	<b>450</b>

Taulukko E7. Klooribentseenien pitoisuudet kuution kokeissa.

**KLOORIBENTSEENIT**

KAASUFAASI (ng/Nm <sup>3</sup> )	Kuution kokeet				
	27.5.2008 PAP, palo	27.5.2008 REF, palo	27.5.2008 REF, sammutus	28.5.2008 REF, palo	28.5.2008 REF, sammutus
1,3-Diklooribentseeni	36	148	360	913	990
1,4-Diklooribentseeni	52	136	252	217	286
1,2-Diklooribentseeni	50	103	386	316	533
1,3,5-Triklooribentseeni	39	124	235	639	822
1,2,4-Triklooribentseeni	52	100	47	130	216
1,2,3-Triklooribentseeni	41	112	33	142	323
1,2,3,4+1,2,3,5-Tetraklooribentseeni	28	50	33	0	61
1,2,4,5-Tetraklooribentseeni	0	0	0	60	0
Pentaklooribentseeni	0	48	0	63	0
Heksaklooribentseeni	0	19	12	18	15
<b>Yhteensä</b>	<b>297</b>	<b>842</b>	<b>1356</b>	<b>2497</b>	<b>3246</b>
<b>HIUKKASFAASI (ng/Nm<sup>3</sup>)</b>					
1,3-Diklooribentseeni	0	0	0	0	0
1,4-Diklooribentseeni	22	17	21	0	30
1,2-Diklooribentseeni	0	0	0	0	0
1,3,5-Triklooribentseeni	0	0	0	0	0
1,2,4-Triklooribentseeni	0	0	0	0	0
1,2,3-Triklooribentseeni	0	0	0	0	0
1,2,3,4+1,2,3,5-Tetraklooribentseeni	0	0	0	0	0
1,2,4,5-Tetraklooribentseeni	0	0	0	0	0
Pentaklooribentseeni	0	0	0	0	0
Heksaklooribentseeni	0	0	0	0	0
<b>Yhteensä</b>	<b>22</b>	<b>17</b>	<b>21</b>	<b>0</b>	<b>30</b>
<b>kaasu+hiukkaset (ng/Nm<sup>3</sup>)</b>					
1,3-Diklooribentseeni	36	148	360	913	990
1,4-Diklooribentseeni	74	153	273	217	317
1,2-Diklooribentseeni	50	103	386	316	533
1,3,5-Triklooribentseeni	39	124	235	639	822
1,2,4-Triklooribentseeni	52	100	47	130	216
1,2,3-Triklooribentseeni	41	112	33	142	323
1,2,3,4+1,2,3,5-Tetraklooribentseeni	28	50	33	0	61
1,2,4,5-Tetraklooribentseeni	0	0	0	60	0
Pentaklooribentseeni	0	48	0	63	0
Heksaklooribentseeni	0	19	12	18	15
<b>Yhteensä</b>	<b>319</b>	<b>859</b>	<b>1378</b>	<b>2497</b>	<b>3276</b>

Taulukko E8. Klooribentseenien pitoisuudet kenttäkokeissa.

**KLOORIBENTSEENIT**

KAASUFAASI (ng/Nm <sup>3</sup> )	Kenttäkokeet					
	3.6.2008 REF, palo	3.6.2008 REF, sammutus	3.6.2008 REF, kenttä	4.6.2008 PAP, palo	4.6.2008 PAP, sammutus	4.6.2008 PAP, kenttä
1,3-Diklooribentseeni	-	1	-	0	1	0
1,4-Diklooribentseeni	-	1	-	1	1	0
1,2-Diklooribentseeni	-	1	-	0	1	0
1,3,5-Triklooribentseeni	-	1	-	0	1	0
1,2,4-Triklooribentseeni	-	0	-	0	0	0
1,2,3-Triklooribentseeni	-	0	-	0	0	0
1,2,3,4+1,2,3,5-Tetraklooribentseeni	-	0	-	0	0	0
1,2,4,5-Tetraklooribentseeni	-	0	-	0	0	0
Pentaklooribentseeni	-	0	-	0	0	4
Heksaklooribentseeni	-	0	-	0	0	0
<b>Yhteensä</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>6</b>
<b>HIUKKASFAASI (ng/Nm<sup>3</sup>)</b>						
1,3-Diklooribentseeni	-	-	0	0	1	0
1,4-Diklooribentseeni	-	-	0	0	2	0
1,2-Diklooribentseeni	-	-	0	0	1	0
1,3,5-Triklooribentseeni	-	-	0	0	1	0
1,2,4-Triklooribentseeni	-	-	0	0	1	0
1,2,3-Triklooribentseeni	-	-	0	0	1	0
1,2,3,4+1,2,3,5-Tetraklooribentseeni	-	-	0	0	0	0
1,2,4,5-Tetraklooribentseeni	-	-	0	0	0	0
Pentaklooribentseeni	-	-	0	0	0	0
Heksaklooribentseeni	-	-	0	0	0	0
<b>Yhteensä</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>7</b>	<b>1</b>
<b>kaasu+hiukkaset (ng/Nm<sup>3</sup>)</b>						
1,3-Diklooribentseeni	-	1	0	0	2	0
1,4-Diklooribentseeni	-	1	0	1	3	0
1,2-Diklooribentseeni	-	1	0	0	2	0
1,3,5-Triklooribentseeni	-	1	0	0	2	1
1,2,4-Triklooribentseeni	-	0	0	0	1	1
1,2,3-Triklooribentseeni	-	0	0	0	1	1
1,2,3,4+1,2,3,5-Tetraklooribentseeni	-	0	0	0	0	0
1,2,4,5-Tetraklooribentseeni	-	0	0	0	0	0
Pentaklooribentseeni	-	0	0	0	0	4
Heksaklooribentseeni	-	0	0	0	0	0
<b>Yhteensä</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>11</b>	<b>7</b>

Taulukko E9. Kloorifenolien pitoisuudet kuution kokeissa.

**KLOORIFENOLIT**

KAASUFAASI (ng/Nm <sup>3</sup> )	Kuution kokeet				
	27.5.2008	27.5.2008	27.5.2008	28.5.2008	28.5.2008
	PAP, palo	REF, palo	REF, sammutus	REF, palo	REF, sammutus
2-Kloorifenoli	4413	3526	1627	6762	10234
3-Kloorifenoli	448	742	529	5093	2473
4-Kloorifenoli	1758	1108	755	3485	2460
2,6-Dikloorifenoli	116	122	101	232	639
2,4+2,5-Dikloorifenoli	256	282	219	729	962
3,4-Dikloorifenoli	17	14	14	18	18
2,3-Dikloorifenoli	0	0	0	69	30
3,5-Dikloorifenoli	0	0	0	0	79
2,4,6-Trikloorifenoli	270	43	42	54	171
2,3,6-Trikloorifenoli	0	10	12	0	18
2,3,5-Trikloorifenoli	0	17	26	0	107
2,4,5-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0
2,3,4-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0
3,4,5-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0
2,3,5,6-Tetrakloorifenoli	0	24	5	99	174
2,3,4,6-Tetrakloorifenoli	0	53	47	90	113
Pentakloorifenoli	0	124	73	271	253
<b>Yhteensä</b>	<b>7276</b>	<b>6065</b>	<b>3449</b>	<b>16904</b>	<b>17731</b>

**HIUKKASFAASI (ng/Nm<sup>3</sup>)**

2-Kloorifenoli	17	26	26	30	40
3-Kloorifenoli	0	7	14	24	70
4-Kloorifenoli	52	12	35	42	100
2,6-Dikloorifenoli	0	0	0	0	0
2,4+2,5-Dikloorifenoli	0	10	0	0	0
3,4-Dikloorifenoli	17	14	14	18	18
2,3-Dikloorifenoli	0	0	0	0	0
3,5-Dikloorifenoli	0	0	0	0	0
2,4,6-Trikloorifenoli	0	0	9	0	0
2,3,6-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0
2,3,5-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0
2,4,5-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0
2,3,4-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0
3,4,5-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0
2,3,5,6-Tetrakloorifenoli	0	0	5	24	24
2,3,4,6-Tetrakloorifenoli	0	0	5	0	18
Pentakloorifenoli	0	0	16	21	164
<b>Yhteensä</b>	<b>85</b>	<b>69</b>	<b>125</b>	<b>160</b>	<b>435</b>

**kaasu+hiukkaset (ng/Nm<sup>3</sup>)**

2-Kloorifenoli	4429	3553	1653	6792	10274
3-Kloorifenoli	448	749	543	5117	2543
4-Kloorifenoli	1810	1120	790	3527	2561
2,6-Dikloorifenoli	116	122	101	232	639
2,4+2,5-Dikloorifenoli	256	292	219	729	962
3,4-Dikloorifenoli	33	29	28	36	37
2,3-Dikloorifenoli	0	0	0	69	30
3,5-Dikloorifenoli	0	0	0	0	79
2,4,6-Trikloorifenoli	270	43	52	54	171
2,3,6-Trikloorifenoli	0	10	12	0	18
2,3,5-Trikloorifenoli	0	17	26	0	107
2,4,5-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0
2,3,4-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0
3,4,5-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0
2,3,5,6-Tetrakloorifenoli	0	24	9	123	198
2,3,4,6-Tetrakloorifenoli	0	53	52	90	131
Pentakloorifenoli	0	124	89	292	417
<b>Yhteensä</b>	<b>7362</b>	<b>6134</b>	<b>3573</b>	<b>17063</b>	<b>18167</b>

Taulukko E10. Kloorifenolien pitoisuudet kenttäkokeissa.

**KLOORIFENOLIT**

KAASUFAASI (ng/Nm3)	Kenttäkokeet					
	3.6.2008		3.6.2008		4.6.2008	
	REF, palo	REF, sammutus	REF, kenttä	PAP, palo	PAP, sammutus	PAP, kenttä
2-Kloorifenoli	18	369	13	496	76	3
3-Kloorifenoli	114	222	28	737	250	1
4-Kloorifenoli	114	231	39	1313	981	5
2,6-Dikloorifenoli	5	42	5	272	67	0
2,4+2,5-Dikloorifenoli	17	88	12	476	224	2
3,4-Dikloorifenoli	0	1	0	0	1	0
2,3-Dikloorifenoli	0	8	1	9	0	0
3,5-Dikloorifenoli	3	4	0	12	12	0
2,4,6-Trikloorifenoli	7	15	0	122	54	0
2,3,6-Trikloorifenoli	0	2	0	3	1	0
2,3,5-Trikloorifenoli	2	7	0	0	0	0
2,4,5-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0	0
2,3,4-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0	0
3,4,5-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0	0
2,3,5,6-Tetrakloorifenoli	3	3	0	1	0	0
2,3,4,6-Tetrakloorifenoli	2	2	0	2	1	0
Pentakloorifenoli	2	1	0	1	0	0
<b>Yhteensä</b>	<b>286</b>	<b>995</b>	<b>99</b>	<b>3444</b>	<b>1668</b>	<b>13</b>

**HIUKKASFAASI (ng/Nm3)**

2-Kloorifenoli	0	0	0	1	2	0
3-Kloorifenoli	11	32	0	22	1	0
4-Kloorifenoli	16	31	0	176	4	0
2,6-Dikloorifenoli	0	0	0	2	0	0
2,4+2,5-Dikloorifenoli	3	0	0	7	1	0
3,4-Dikloorifenoli	0	1	0	0	1	0
2,3-Dikloorifenoli	0	0	0	0	0	0
3,5-Dikloorifenoli	3	0	0	21	3	0
2,4,6-Trikloorifenoli	2	5	0	19	2	0
2,3,6-Trikloorifenoli	0	0	0	1	0	0
2,3,5-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0	0
2,4,5-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0	0
2,3,4-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0	0
3,4,5-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0	0
2,3,5,6-Tetrakloorifenoli	2	7	0	1	3	0
2,3,4,6-Tetrakloorifenoli	1	5	0	3	2	0
Pentakloorifenoli	6	9	1	5	3	0
<b>Yhteensä</b>	<b>45</b>	<b>88</b>	<b>1</b>	<b>259</b>	<b>22</b>	<b>0</b>

**kaasu+hiukkaset (ng/Nm3)**

2-Kloorifenoli	18	369	13	497	78	3
3-Kloorifenoli	125	254	28	759	251	1
4-Kloorifenoli	130	262	39	1489	985	5
2,6-Dikloorifenoli	5	42	5	274	68	0
2,4+2,5-Dikloorifenoli	19	88	12	483	225	2
3,4-Dikloorifenoli	1	1	0	0	1	1
2,3-Dikloorifenoli	0	8	1	9	0	0
3,5-Dikloorifenoli	6	4	0	33	15	0
2,4,6-Trikloorifenoli	9	20	0	141	56	0
2,3,6-Trikloorifenoli	1	2	0	4	1	0
2,3,5-Trikloorifenoli	2	7	0	0	0	0
2,4,5-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0	0
2,3,4-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0	0
3,4,5-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0	0
2,3,5,6-Tetrakloorifenoli	5	10	0	2	4	0
2,3,4,6-Tetrakloorifenoli	3	7	0	5	3	0
Pentakloorifenoli	8	10	1	6	4	0
<b>Yhteensä</b>	<b>332</b>	<b>1084</b>	<b>100</b>	<b>3703</b>	<b>1690</b>	<b>13</b>



Taulukko E11. PCB-yhdisteiden pitoisuudet kuution kokeissa.

**POLYKLOORATUT BIFENYYLIT (PCB)**

KAASUFAASI (ng/Nm <sup>3</sup> )	Kuution kokeet				
	27.5.2008 PAP, palo	27.5.2008 REF, palo	27.5.2008 REF, sammutus	28.5.2008 REF, palo	28.5.2008 REF, sammutus
2,2',5'-TCB	0	0	0	0	0
2,3,3'-TCB	0	0	0	0	0
2,4,4'-TCB	0	0	0	0	0
2,4',5'-TCB	0	0	0	0	0
2,2',3,5'-TeCB	0	0	0	0	0
2,2',5,5'-TeCB	0	0	0	0	0
2,2',4,5,5'-PeCB	0	0	0	0	0
2,2',3,4',5',6'-HxCB	0	0	0	0	0
2,3',4,4',5'-PeCB	0	0	0	0	0
2,2',4,4',5,5'-HxCB	0	0	0	0	0
2,3,3',4,4'-PeCB	0	0	0	0	0
2,2',3,4,4',5'-HxCB	0	0	0	0	0
2,2',3,4,4',5,5'-HpCB	0	0	0	0	0
2,2',3,3',4,4',5'-HpCB	0	0	0	0	0
2,2',3,3',4,4',5,5'-OcCB	0	0	0	0	0
<b>Yhteensä</b>	0	0	0	0	0

**HIUKKASFAASI (ng/Nm<sup>3</sup>)**

2,2',5'-TCB	0	0	0	0	0
2,3,3'-TCB	0	0	0	0	0
2,4,4'-TCB	0	0	0	0	0
2,4',5'-TCB	0	0	0	0	0
2,2',3,5'-TeCB	0	0	0	0	0
2,2',5,5'-TeCB	0	0	0	0	0
2,2',4,5,5'-PeCB	0	0	0	0	0
2,2',3,4',5',6'-HxCB	0	0	0	0	0
2,3',4,4',5'-PeCB	0	0	0	0	0
2,2',4,4',5,5'-HxCB	0	0	0	0	0
2,3,3',4,4'-PeCB	0	0	0	0	0
2,2',3,4,4',5'-HxCB	0	0	0	0	0
2,2',3,4,4',5,5'-HpCB	0	0	0	0	0
2,2',3,3',4,4',5'-HpCB	0	0	0	0	0
2,2',3,3',4,4',5,5'-OcCB	0	0	0	0	0
<b>Yhteensä</b>	0	0	0	0	0

**kaasu+hiukkaset (ng/Nm<sup>3</sup>)**

2,2',5'-TCB	0	0	0	0	0
2,3,3'-TCB	0	0	0	0	0
2,4,4'-TCB	0	0	0	0	0
2,4',5'-TCB	0	0	0	0	0
2,2',3,5'-TeCB	0	0	0	0	0
2,2',5,5'-TeCB	0	0	0	0	0
2,2',4,5,5'-PeCB	0	0	0	0	0
2,2',3,4',5',6'-HxCB	0	0	0	0	0
2,3',4,4',5'-PeCB	0	0	0	0	0
2,2',4,4',5,5'-HxCB	0	0	0	0	0
2,3,3',4,4'-PeCB	0	0	0	0	0
2,2',3,4,4',5'-HxCB	0	0	0	0	0
2,2',3,4,4',5,5'-HpCB	0	0	0	0	0
2,2',3,3',4,4',5'-HpCB	0	0	0	0	0
2,2',3,3',4,4',5,5'-OcCB	0	0	0	0	0
<b>Yhteensä</b>	0	0	0	0	0

Taulukko E12. PCB-yhdisteiden pitoisuudet kenttäkokeissa.

**POLYKLOORATUT BIFENYYLIT (PCB)**

KAASUFAASI (ng/Nm3)	Kenttäkokeet						
	3.6.2008 REF, palo	3.6.2008 REF, sammutus	3.6.2008 REF, kenttä	4.6.2008 PAP, palo	4.6.2008 PAP, sammutus	4.6.2008 PAP, kenttä	
2,2',5'-TCB	-	0	-	-	20	111	0
2,3,3'-TCB	-	0	-	-	17	41	0
2,4,4'-TCB	-	0	-	-	17	55	0
2,4',5'-TCB	-	0	-	-	64	56	0
2,2',3,5'-TeCB	-	0	-	-	7	25	0
2,2',5,5'-TeCB	-	0	-	-	0	25	0
2,2',4,5,5'-PeCB	-	0	-	-	0	1	0
2,2',3,4',5',6-HxCB	-	0	-	-	0	0	0
2,3',4,4',5'-PeCB	-	0	-	-	0	0	0
2,2',4,4',5,5'-HxCB	-	0	-	-	0	0	0
2,3,3',4,4'-PeCB	-	0	-	-	0	0	0
2,2',3,4,4',5'-HxCB	-	0	-	-	0	0	0
2,2',3,4,4',5,5'-HpCB	-	0	-	-	0	0	0
2,2',3,3',4,4',5'-HpCB	-	0	-	-	0	0	0
2,2',3,3',4,4',5,5'-OCCB	-	0	-	-	0	0	0
<b>Yhteensä</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>125</b>	<b>315</b>	<b>1</b>

**HIUKKASFAASI (ng/Nm3)**

2,2',5'-TCB	-	-	0	4	1	0
2,3,3'-TCB	-	-	0	82	5	0
2,4,4'-TCB	-	-	0	107	5	0
2,4',5'-TCB	-	-	0	85	5	0
2,2',3,5'-TeCB	-	-	0	28	6	0
2,2',5,5'-TeCB	-	-	0	28	6	0
2,2',4,5,5'-PeCB	-	-	0	11	5	0
2,2',3,4',5',6-HxCB	-	-	0	2	1	0
2,3',4,4',5'-PeCB	-	-	0	6	3	0
2,2',4,4',5,5'-HxCB	-	-	0	1	1	0
2,3,3',4,4'-PeCB	-	-	0	4	2	0
2,2',3,4,4',5'-HxCB	-	-	0	2	1	0
2,2',3,4,4',5,5'-HpCB	-	-	0	0	0	0
2,2',3,3',4,4',5'-HpCB	-	-	0	0	0	0
2,2',3,3',4,4',5,5'-OCCB	-	-	0	0	0	0
<b>Yhteensä</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>360</b>	<b>40</b>	<b>0</b>

**kaasu+hiukkaset (ng/Nm3)**

2,2',5'-TCB	-	-	-	23	112	0
2,3,3'-TCB	-	-	-	99	46	0
2,4,4'-TCB	-	-	-	124	59	0
2,4',5'-TCB	-	-	-	149	61	0
2,2',3,5'-TeCB	-	-	-	36	31	0
2,2',5,5'-TeCB	-	-	-	28	31	0
2,2',4,5,5'-PeCB	-	-	-	11	5	0
2,2',3,4',5',6-HxCB	-	-	-	2	1	0
2,3',4,4',5'-PeCB	-	-	-	6	3	0
2,2',4,4',5,5'-HxCB	-	-	-	1	1	0
2,3,3',4,4'-PeCB	-	-	-	4	2	0
2,2',3,4,4',5'-HxCB	-	-	-	2	1	0
2,2',3,4,4',5,5'-HpCB	-	-	-	0	0	0
2,2',3,3',4,4',5'-HpCB	-	-	-	0	0	0
2,2',3,3',4,4',5,5'-OCCB	-	-	-	0	0	0
<b>Yhteensä</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>484</b>	<b>355</b>	<b>1</b>

Taulukko E13. PCDD/F-yhdisteiden pitoisuudet kuution kokeissa.

**DIOKSIINIT JA FURAANIT (PCDD/PCDF)**

KAASUFAASI (pg/Nm <sup>3</sup> )	Kuution kokeet					
	27.5.2008		27.5.2008		28.5.2008	
	PAP, palo	REF, palo	REF, sammutus	REF, palo	REF, sammutus	REF, sammutus
2,3,7,8-TCDD	0	17	68	36	33	
1,2,3,7,8-PeCDD	0	136	291	313	189	
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0	60	66	148	37	
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0	258	313	648	167	
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0	187	190	422	82	
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0	2132	912	4169	405	
OCDD	0	6773	1422	11274	502	
2,3,7,8-TCDF	8	84	169	169	143	
1,2,3,7,8-PeCDF	0	60	-	93	0	
2,3,4,7,8-PeCDF	0	53	96	99	58	
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0	0	35	0	0	
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0	0	45	130	0	
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0	43	45	75	30	
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0	0	-	0	0	
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0	254	129	488	88	
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0	0	-	0	0	
OCDF	0	134	-	169	0	
<b>Yhteensä</b>	<b>8</b>	<b>10189</b>	<b>3782</b>	<b>18232</b>	<b>1736</b>	

**HIUKKASFAASI (pg/Nm<sup>3</sup>)**

2,3,7,8-TCDD	0	0	28	0	104
1,2,3,7,8-PeCDD	0	22	465	0	877
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0	24	183	0	371
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0	84	1187	108	1501
1,2,3,7,8,9-HxCDD	17	57	992	0	856
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	85	1017	6772	0	10204
OCDD	209	5665	18392	0	28636
2,3,7,8-TCDF	0	0	89	0	295
1,2,3,7,8-PeCDF	0	0	71	0	-
2,3,4,7,8-PeCDF	0	0	108	0	371
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0	0	113	0	274
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0	0	0	0	289
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0	19	139	0	454
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0	0	0	0	-
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0	0	472	66	1504
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0	0	0	0	-
OCDF	0	0	188	0	588
<b>Yhteensä</b>	<b>311</b>	<b>6888</b>	<b>29201</b>	<b>175</b>	<b>46325</b>

**kaasu+hiukkaset (pg/Nm<sup>3</sup>)**

2,3,7,8-TCDD	0	17	96	36	137
1,2,3,7,8-PeCDD	0	158	757	313	1066
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0	84	249	148	408
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0	342	1500	756	1669
1,2,3,7,8,9-HxCDD	17	244	1182	422	938
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	85	3148	7685	4169	10609
OCDD	209	12438	19814	11274	29138
2,3,7,8-TCDF	8	84	259	169	438
1,2,3,7,8-PeCDF	0	60	71	93	0
2,3,4,7,8-PeCDF	0	53	205	99	429
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0	0	148	0	274
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0	0	45	130	289
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0	62	183	75	484
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0	0	0	0	0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0	254	602	554	1593
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0	0	0	0	0
OCDF	0	134	188	169	588
<b>Yhteensä</b>	<b>319</b>	<b>17077</b>	<b>32983</b>	<b>18407</b>	<b>48060</b>

Taulukko E14. PCDD/F-yhdisteiden pitoisuudet kenttäkokeissa.

**DIOKSIINIT JA FURAANIT (PCDD/PCDF)**

KAASUFAASI (pg/Nm <sup>3</sup> )	Kenttäkokeet					
	3.6.2008 REF, palo	3.6.2008 REF, sammutus	3.6.2008 REF, kenttä	4.6.2008 PAP, palo	4.6.2008 PAP, sammutus	4.6.2008 PAP, kenttä
2,3,7,8-TCDD	0	0	0	0	0	0
1,2,3,7,8-PeCDD	2	4	0	0	0	0
1,2,3,4,7,8-HxCDD	1	1	0	0	0	0
1,2,3,6,7,8-HxCDD	2	4	0	0	0	0
1,2,3,7,8,9-HxCDD	2	3	0	0	0	0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	14	21	0	1	0	0
OCDD	31	49	0	2	0	0
2,3,7,8-TCDF	2	2	0	0	0	0
1,2,3,7,8-PeCDF	1	1	0	0	0	0
2,3,4,7,8-PeCDF	1	1	0	0	0	0
1,2,3,4,7,8-HxCDF	1	0	0	0	0	0
1,2,3,6,7,8-HxCDF	1	0	0	0	0	0
2,3,4,6,7,8-HxCDF	1	0	0	0	0	0
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0	0	0	0	0	0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	4	2	0	0	0	0
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0	0	0	0	0	0
OCDF	1	0	0	0	0	0
<b>Yhteensä</b>	<b>64</b>	<b>88</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

**HIUKKASFAASI (pg/Nm<sup>3</sup>)**

2,3,7,8-TCDD	8	9	1	1	0	0
1,2,3,7,8-PeCDD	63	80	4	4	2	0
1,2,3,4,7,8-HxCDD	22	24	1	1	0	0
1,2,3,6,7,8-HxCDD	70	91	3	6	3	0
1,2,3,7,8,9-HxCDD	56	87	3	4	3	0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	457	463	17	22	12	0
OCDD	1158	1291	35	48	25	0
2,3,7,8-TCDF	43	34	2	0	0	0
1,2,3,7,8-PeCDF	-	24	1	0	0	0
2,3,4,7,8-PeCDF	37	28	2	1	0	0
1,2,3,4,7,8-HxCDF	22	17	1	1	0	0
1,2,3,6,7,8-HxCDF	22	19	2	1	0	0
2,3,4,6,7,8-HxCDF	35	20	2	0	0	0
1,2,3,7,8,9-HxCDF	-	-	0	0	0	0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	79	48	6	6	4	0
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	-	-	0	0	0	0
OCDF	20	-	1	4	3	0
<b>Yhteensä</b>	<b>2093</b>	<b>2235</b>	<b>83</b>	<b>99</b>	<b>53</b>	<b>0</b>

**kaasu+hiukkaset (pg/Nm<sup>3</sup>)**

2,3,7,8-TCDD	9	9	1	1	0	0
1,2,3,7,8-PeCDD	65	84	4	4	2	0
1,2,3,4,7,8-HxCDD	23	25	1	1	0	0
1,2,3,6,7,8-HxCDD	72	95	3	6	3	0
1,2,3,7,8,9-HxCDD	58	90	3	4	3	0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	470	484	18	23	12	0
OCDD	1189	1339	35	49	25	0
2,3,7,8-TCDF	45	36	2	0	0	0
1,2,3,7,8-PeCDF	1	25	1	0	0	0
2,3,4,7,8-PeCDF	39	29	2	1	0	0
1,2,3,4,7,8-HxCDF	23	17	1	1	0	0
1,2,3,6,7,8-HxCDF	23	19	2	1	0	0
2,3,4,6,7,8-HxCDF	36	20	2	0	0	0
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0	0	0	0	0	0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	84	51	6	6	4	0
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0	0	0	0	0	0
OCDF	21	0	1	4	3	0
<b>Yhteensä</b>	<b>2157</b>	<b>2322</b>	<b>84</b>	<b>102</b>	<b>53</b>	<b>0</b>

Taulukko E15. PCDD/F-yhdisteiden pitoisuus toksisuusekvivalentteina (TEQ) kuution kokeissa.

**DIOKSIINIT JA FURAANIT TCDD-ekv.**

KAASUFAASI (pg TEQ/Nm <sup>3</sup> )	TEF-arvo (Nordic)	Kuution kokeet					
		27.5.2008 PAP, palo	27.5.2008 REF, palo	27.5.2008 REF, sammutus	28.5.2008 REF, palo	28.5.2008 REF, sammutus	
2,3,7,8-TCDD	1	0	0	17	68	36	33
1,2,3,7,8-PeCDD	0.5	0	0	68	146	157	94
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1	0	0	6	7	15	4
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1	0	0	26	31	65	17
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1	0	0	19	19	42	8
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.01	0	0	21	9	42	4
OCDD	0.001	0	0	7	1	11	1
2,3,7,8-TCDF	0.1	1	1	8	17	17	14
1,2,3,7,8-PeCDF	0.01	0	0	1	-	1	0
2,3,4,7,8-PeCDF	0.5	0	0	26	48	50	29
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.1	0	0	0	4	0	0
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1	0	0	0	4	13	0
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.1	0	0	4	4	8	3
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1	0	0	0	-	0	0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.01	0	0	3	1	5	1
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.01	0	0	0	-	0	0
OCDF	0.001	0	0	0	-	0	0
<b>Yhteensä</b>			1	206	360	460	208

HIUKKASFAASI (pg TEQ/Nm <sup>3</sup> )							
2,3,7,8-TCDD	1	0	0	0	28	0	104
1,2,3,7,8-PeCDD	0.5	0	0	11	233	0	438
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1	0	0	2	18	0	37
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1	0	0	8	119	11	150
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1	2	6	6	99	0	86
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.01	1	10	10	68	0	102
OCDD	0.001	0	6	6	18	0	29
2,3,7,8-TCDF	0.1	0	0	0	9	0	30
1,2,3,7,8-PeCDF	0.01	0	0	0	1	0	-
2,3,4,7,8-PeCDF	0.5	0	0	0	54	0	186
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.1	0	0	0	11	0	27
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1	0	0	0	0	0	29
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.1	0	2	2	14	0	45
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1	0	0	0	0	0	-
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.01	0	0	0	5	1	15
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.01	0	0	0	0	0	-
OCDF	0.001	0	0	0	0	0	1
<b>Yhteensä</b>		3	45	677	12	1278	

kaasu+hiukkaset (pg TEQ/Nm <sup>3</sup> )							
2,3,7,8-TCDD	1	0	0	17	96	36	137
1,2,3,7,8-PeCDD	0.5	0	0	79	378	157	533
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1	0	0	8	25	15	41
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1	0	0	34	150	76	167
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1	2	24	24	118	42	94
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.01	1	31	31	77	42	106
OCDD	0.001	0	12	12	20	11	29
2,3,7,8-TCDF	0.1	1	8	8	26	17	44
1,2,3,7,8-PeCDF	0.01	0	1	1	1	1	0
2,3,4,7,8-PeCDF	0.5	0	26	26	102	50	215
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.1	0	0	0	15	0	27
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1	0	0	0	4	13	29
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.1	0	6	6	18	8	48
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1	0	0	0	0	0	0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.01	0	3	3	6	6	16
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.01	0	0	0	0	0	0
OCDF	0.001	0	0	0	0	0	1
<b>Yhteensä</b>		4	251	1037	472	1486	

Taulukko E16. PCDD/F-yhdisteiden pitoisuus toksisuusekvivalentteina (TEQ) kenttäkokeissa.

**DIOKSIINIT JA FURAAINIT TCDD-ekv.**

KAASUFAASI (pg TEQ/Nm <sup>3</sup> )	TEF-arvo (Nordic)	Kenttäkokeet					
		3.6.2008 REF, palo	3.6.2008 REF, sammutus	3.6.2008 REF, kenttä	4.6.2008 PAP, palo	4.6.2008 PAP, sammutus	4.6.2008 PAP, kenttä
2,3,7,8-TCDD	1	0	0	0	0	0	0
1,2,3,7,8-PeCDD	0.5	1	2	0	0	0	0
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1	0	0	0	0	0	0
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1	0	0	0	0	0	0
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1	0	0	0	0	0	0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.01	0	0	0	0	0	0
OCDD	0.001	0	0	0	0	0	0
2,3,7,8-TCDF	0.1	0	0	0	0	0	0
1,2,3,7,8-PeCDF	0.01	0	0	0	0	0	0
2,3,4,7,8-PeCDF	0.5	1	1	0	0	0	0
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.1	0	0	0	0	0	0
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1	0	0	0	0	0	0
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.1	0	0	0	0	0	0
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1	0	0	0	0	0	0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.01	0	0	0	0	0	0
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.01	0	0	0	0	0	0
OCDF	0.001	0	0	0	0	0	0
<b>Yhteensä</b>		<b>3</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>HIUKKASFAASI (pg TEQ/Nm<sup>3</sup>)</b>							
2,3,7,8-TCDD	1	8	9	1	1	0	0
1,2,3,7,8-PeCDD	0.5	31	40	2	2	1	0
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1	2	2	0	0	0	0
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1	7	9	0	1	0	0
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1	6	9	0	0	0	0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.01	5	5	0	0	0	0
OCDD	0.001	1	1	0	0	0	0
2,3,7,8-TCDF	0.1	4	3	0	0	0	0
1,2,3,7,8-PeCDF	0.01	-	0	0	0	0	0
2,3,4,7,8-PeCDF	0.5	19	14	1	1	0	0
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.1	2	2	0	0	0	0
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1	2	2	0	0	0	0
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.1	3	2	0	0	0	0
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1	-	-	0	0	0	0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.01	1	0	0	0	0	0
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.01	-	-	0	0	0	0
OCDF	0.001	0	-	0	0	0	0
<b>Yhteensä</b>		<b>92</b>	<b>99</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>0</b>
<b>kaasu+hiukkaset (pg TEQ/Nm<sup>3</sup>)</b>							
2,3,7,8-TCDD	1	9	9	1	1	0	0
1,2,3,7,8-PeCDD	0.5	32	42	2	2	1	0
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1	2	2	0	0	0	0
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1	7	9	0	1	0	0
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1	6	9	0	0	0	0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.01	5	5	0	0	0	0
OCDD	0.001	1	1	0	0	0	0
2,3,7,8-TCDF	0.1	4	4	0	0	0	0
1,2,3,7,8-PeCDF	0.01	0	0	0	0	0	0
2,3,4,7,8-PeCDF	0.5	19	14	1	1	0	0
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.1	2	2	0	0	0	0
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1	2	2	0	0	0	0
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.1	4	2	0	0	0	0
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1	0	0	0	0	0	0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.01	1	1	0	0	0	0
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.01	0	0	0	0	0	0
OCDF	0.001	0	0	0	0	0	0
<b>Yhteensä</b>		<b>95</b>	<b>103</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>0</b>

Taulukko E17. PAH-yhdisteiden pitoisuudet sammutusvesinäytteissä.

**POLYAROMAATTISET HIILIVEDYT (PAH)**

Sammutusvedet (ng/L)	Kuution kokeet			Kenttäkokeet		
	27.5.2008	27.5.2008	28.5.2008	3.6.2008	4.6.2008	
	PAP	REF	REF	REF	PAP	
Naftaleeni		604	906	12922	156	1908
Asenaftyleeni		276	396	3446	130	454
Asenafteeni		294	3492	30824	98	2704
Fluoreeni		240	468	12766	48	620
Fenantreeni		220	294	754	66	262
Antraseeni		0	0	88	0	0
Fluoranteeni		0	0	166	0	0
Pyreeni		0	0	0	0	0
Benzo(a)antraseeni		0	0	0	0	0
Kryseeni		0	0	0	0	0
Benzo(b)fluoranteeni		0	0	0	0	0
Benzo(k)fluoranteeni		0	0	0	0	0
Benzo(a)pyreeni		0	0	0	0	0
Indeno(1,2,3-cd)pyreeni		0	0	0	0	0
Dibenzo(a,h)antraseeni		0	0	0	0	0
Benzo(g,h,i)peryleeni		0	0	0	0	0
<b>Yhteensä</b>		<b>1634</b>	<b>5556</b>	<b>60966</b>	<b>498</b>	<b>5948</b>

Taulukko E18. Klooribentseenien pitoisuudet sammutusvesinäytteissä.

**KLOORIBENTSEENIT**

Sammutusvedet (ng/L)	Kuution kokeet			Kenttäkokeet		
	27.5.2008	27.5.2008	28.5.2008	3.6.2008	4.6.2008	
	PAP	REF	REF	REF	PAP	
1,3-Diklooribentseeni		0	0	0	0	0
1,4-Diklooribentseeni		0	0	0	0	0
1,2-Diklooribentseeni		0	0	0	0	0
1,3,5-Triklooribentseeni		0	0	0	0	0
1,2,4-Triklooribentseeni		0	0	0	0	0
1,2,3-Triklooribentseeni		0	0	0	0	0
1,2,3,4+1,2,3,5-Tetraklooribentseeni		0	0	0	0	0
1,2,4,5-Tetraklooribentseeni		0	0	0	0	0
Pentaklooribentseeni		0	0	0	0	0
Heksaklooribentseeni		0	0	0	0	0
<b>Yhteensä</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Taulukko E19. Kloorifenolien pitoisuudet sammutusvesinäytteissä.

**KLOORIFENOLIT**

Sammutusvedet (ng/L)	Kuution kokeet			Kenttäkokeet	
	27.5.2008	27.5.2008	28.5.2008	3.6.2008	4.6.2008
	PAP	REF	REF	REF	PAP
2-Kloorifenoli	1100	50	1695	1280	3125
3-Kloorifenoli	205	900	635	230	350
4-Kloorifenoli	2630	90	1080	610	1975
2,6-Dikloorifenoli	0	0	0	0	150
2,4+2,5-Dikloorifenoli	0	30	0	10	425
3,4-Dikloorifenoli	0	0	0	0	0
2,3-Dikloorifenoli	0	0	0	0	0
3,5-Dikloorifenoli	0	0	0	0	0
2,4,6-Trikloorifenoli	30	30	25	10	275
2,3,6-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0
2,3,5-Trikloorifenoli	0	0	0	45	0
2,4,5-Trikloorifenoli	155	0	30	20	15
2,3,4-Trikloorifenoli	0	0	0	0	40
3,4,5-Trikloorifenoli	0	0	0	0	0
2,3,5,6-Tetrakloorifenoli	0	345	65	80	0
2,3,4,6-Tetrakloorifenoli	0	260	115	105	0
Pentakloorifenoli	0	275	60	60	0
<b>Yhteensä</b>	<b>4120</b>	<b>1980</b>	<b>3705</b>	<b>2450</b>	<b>6355</b>

Taulukko E20. PCB-yhdisteiden pitoisuudet sammutusvesinäytteissä.

**POLYKLOORATUT BIFENYYLIT (PCB)**

Sammutusvedet (ng/L)	Kuution kokeet			Kenttäkokeet	
	27.5.2008	27.5.2008	28.5.2008	3.6.2008	4.6.2008
	PAP	REF	REF	REF	PAP
2,2',5'-TCB	0	0	0	0	0
2,3,3'-TCB	0	0	0	0	0
2,4,4'-TCB	0	0	0	0	0
2,4',5'-TCB	0	0	0	0	0
2,2',3,5'-TeCB	0	0	0	0	0
2,2',5,5'-TeCB	0	0	0	0	0
2,2',4,5,5'-PeCB	0	0	0	0	0
2,2',3,4',5',6-HxCB	0	0	0	0	0
2,3',4,4',5-PeCB	0	0	0	0	0
2,2',4,4',5,5'-HxCB	0	0	0	0	0
2,3,3',4,4'-PeCB	0	0	0	0	0
2,2',3,4,4',5'-HxCB	0	0	0	0	0
2,2',3,4,4',5,5'-HpCB	0	0	0	0	0
2,2',3,3',4,4',5-HpCB	0	0	0	0	0
2,2',3,3',4,4',5,5'-OcCB	0	0	0	0	0
<b>Yhteensä</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>



Taulukko E21. PCDD/F-yhdisteiden pitoisuudet sammutusvesinäytteissä.

**DIOKSIINIT JA FURAANIT (PCDD/PCDF)**

Sammutusvedet (pg/L)	Kuution kokeet			Kenttäkokeet		
	27.5.2008	27.5.2008	28.5.2008	3.6.2008	4.6.2008	
	PAP	REF	REF	REF	PAP	
2,3,7,8-TCDD		0	0	0	0	0
1,2,3,7,8-PeCDD		0	0	0	0	0
1,2,3,4,7,8-HxCDD		0	0	0	0	0
1,2,3,6,7,8-HxCDD		0	0	0	0	0
1,2,3,7,8,9-HxCDD		0	0	0	0	0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD		0	0	0	0	0
OCDD		0	0	0	0	0
2,3,7,8-TCDF		0	0	0	0	0
1,2,3,7,8-PeCDF		0	0	0	0	0
2,3,4,7,8-PeCDF		0	0	0	0	0
1,2,3,4,7,8-HxCDF		0	0	0	0	0
1,2,3,6,7,8-HxCDF		0	0	0	0	0
2,3,4,6,7,8-HxCDF		0	0	0	0	0
1,2,3,7,8,9-HxCDF		0	0	0	0	0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF		0	0	0	0	0
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF		0	0	0	0	0
OCDF		0	0	0	0	0
<b>Yhteensä</b>		0	0	0	0	0



Tekijä(t) Rinne, Tuomo, Hykkyrä, Hanna, Tillander, Kati, Jäntti, Jarkko, Väisänen, Timo, Yli-Pirilä, Pasi, Nuutinen, Ippo & Ruuskanen, Juhani		
Nimeke <b>Jätekeskusten paloturvallisuus</b> <b>Riskit ympäristölle tulipalotilanteessa</b>		
Tiivistelmä Tutkimuksen keskeisenä tavoitteena oli kartoittaa jätekeskusten paloturvallisuuteen liittyviä tekijöitä sekä jätteiden palamisen ympäristölle aiheuttamia uhkia.  Tutkimuksessa kartoitettiin jätekeskusten paloturvallisuustasoa jätealan toimijoille sekä pelastusviranomaisille suunnatulla kyselyllä sekä tehtiin suppea katsaus jätekeskuksissa sattuneisiin tulipaloihin. Hankkeen kokeellisessa osuudessa tarkasteltiin sekä pienessä että suuressa mittakaavassa eri jätejakeiden palamista sekä sammuttamista ja analysoitiin palamisen ja sammuttamisen aikana syntyvien savukaasujen sekä sammutusjätevesien koostumusta. Kokeellisia tuloksia hyödynnettiin hankkeen laskennallisessa osuudessa, jossa arvioitiin savukaasupäästöjen leviämistä ympäristöön sekä lämpösäteilyn vaikutuksesta aiheutuvaa palon leviämistä kohteesta toiseen.		
ISBN 978-951-38-7250-2 (nid.) 978-951-38-7251-9 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		Projektinumero 6441
Julkaisuaika Joulukuu 2008	Kieli Suomi	Sivuja 125 s. + liitt. 39 s.
Projektin nimi JÄTEPALOT		Toimeksiantaja(t) Palosuojelurahasto, VTT, Paperinkeräys Oy, Jätekukko Oy, Finanssialan keskusliitto ry
Avainsanat waste fire, fire emissions, fire-fighting water, dioxins, PAH, fire safety, environmental impacts, emission factors		Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4520 Faksi 020 722 4374

Tutkimuksen keskeisenä tavoitteena oli kartoittaa jätekeskusten paloturvallisuuteen liittyviä tekijöitä ja jätteiden palamisen ympäristölle aiheuttamia uhkia.

Tutkimuksessa kartoitettiin jätekeskusten paloturvallisuustasoa jätealan toimijoille ja pelastusviranomaisille suunnatulla kyselyllä sekä tehtiin suppea katsaus jätekeskuksissa sattuneisiin tulipaloihin. Hankkeen kokeellisessa osuudessa tarkasteltiin sekä pienessä että suuressa mittakaavassa eri jätejakeiden palamista ja sammuttamista ja analysoitiin palamisen ja sammuttamisen aikana syntyvien savukaasujen sekä sammutusjätevesien koostumusta. Kokeellisia tuloksia hyödynnettiin hankkeen laskennallisessa osuudessa, jossa arvioitiin savukaasupäästöjen leviämistä ympäristöön ja lämpösäteilyn vaikutuksesta aiheutuva palon leviämistä kohteesta toiseen.

---

Julkaisu on saatavana

VTT  
PL 1000  
02044 VTT  
Puh. 020 722 4520  
<http://www.vtt.fi>

Publikationen distribueras av

VTT  
PB 1000  
02044 VTT  
Tel. 020 722 4520  
<http://www.vtt.fi>

This publication is available from

VTT  
P.O. Box 1000  
FI-02044 VTT, Finland  
Phone internat. + 358 20 722 4520  
<http://www.vtt.fi>