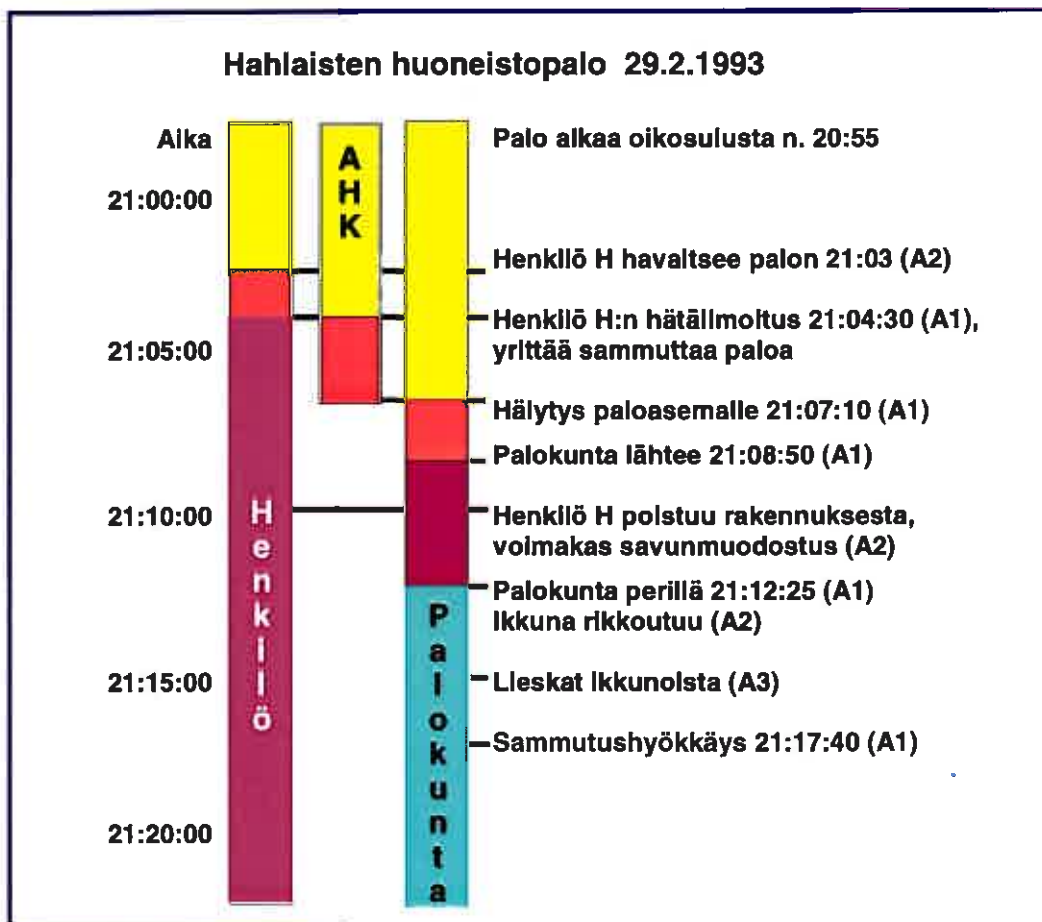


Johan Mangs & Olavi Keski-Rahkonen

Palonsyyn selvittäminen 1

Oppikirja, osa 1



Palonsyyn selvittäminen 1

Oppikirja, osa 1

Johan Mangs & Olavi Keski-Rahkonen

VTT Rakennustekniikka



ISBN 951-38-5172-9

ISSN 1235-0605

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1997

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka, talo- ja palotekniikka, Kivimiehentie 4, PL 1803, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4815

VTT Byggnadsteknik, Byggnadsfysik, fastighets- och brandteknik, Stenkarlsvägen 4, PB 1803, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4815

VTT Building Technology, Building Physics, Building Services and Fire Technology,
Kivimiehentie 4, P.O.Box 1803, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4815

Toimitus Kerttu Tirronen

Otamedia, Espoo 2000

Mangs, Johan & Keski-Rahkonen, Olavi. Palonsyyn selvittäminen 1. Oppikirja, osa 1. Espoo 1997, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1873. 284 s. + liitt. 4 s.

UDK 614.841(075)

Avainsanat fires, fire ignition, fire damage, fire investigation, textbooks

TIIVISTELMÄ

Tässä palonsyyn oppikirjassa on kerätty alan runsaasta kirjallisuudesta ja kirjoittajien omasta kokemukspiiristä tietoa, jonka perusteella palonsyytä tutkitaan erilaisista näkökulmista. Koska asia on hyvin laaja-alainen, useat lähestymistavat ovat mahdollisia. Siksi tässä on pitäydytty käyttämään vain laajalti tunnustettuja lähteitä, jotka ovat peräisin luotettavista asiantuntijaorganisaatioista, tai alan sarjajulkaisuista, joissa julkaistut artikkelit on alistettu ennakolta riippumattomien palotieteen asiantuntijoiden tarkastettaviksi yleisen luonnontieteissä käytetyn periaatteen mukaisesti. Erityisesti on pyritty huolehtimaan siitä, että palon luonnontieteellinen puoli tulee aina esille selvästi, ja vain todennettuihin ilmiöihin perustuen. Yksityiskohtien tarkastamista varten kirjassa on laaja lähdeluettelo, johon tekstissä viitataan. Oppikirja on jaettu kahteen osaan, jotka julkaistaan eri niteinä.

Tämän osan ensimmäinen luku käsittelee lainsäädännöllisiä asioita ja siinä on esitetty lyhyesti palonsyyn tutkimuksen juridiset perusteet Suomessa. Toisessa luvussa käsitellään suppeasti tulipaloissa tapahtuvia luonnontieteellisiä ilmiöitä eli palon fysiikkaa ja kemiaa. Kolmas luku koskettaa palopaikan dokumentointia ja näytteenottoa palojäännöksistä. Neljännessä luvussa keskitytään melko laajasti tärkeään syttymiskohdan etsimiseen ja tutkimiseen. Luvussa viisi paneudutaan syttymissyiden selvittämiseen. Luku kuusi käsittelee palon kehittymistä rakennuksessa ja palojen rekonstruktioita sekä numeerisin että fyysisin menetelmin. Luvussa seitsemän kuvataan ajoneuvopalojen ja luvussa kahdeksan kaasupalojen tutkintaa. Luku yhdeksän esittelee räjähdyksiä, luku kymmenen maastopaloja ja luku yksitoista palokuolemia tilastojen, kuolinsyiden selvittelyn ja palokuolemien tutkimuksen kannalta. Lopussa on laaja lähdeluettelo luotettavaan alan kansainväliseen kirjallisuuteen. Liitteeksi on taulukoitu muistilista palonsyyn selvittämisen tueksi.

ALKUSANAT

Tämä palonsyyn selvittämisen oppikirja on kirjoitettu palo- ja poliisiviranomaisten, vakuutusyhtiöiden paloasiantuntijoiden sekä palotutkijoiden käyttöön. Koska kohderyhmä on näin moninainen, tason valinta ei ole ollut helppoa. Tavoitteena on ollut laatia kattava, vähintään keskiasteen teknisen koulutuksen omaavan henkilön esitietopohjaa edellyttävä esitys paloilmioista ja palonsyyn tutkinnasta nykyaikaisen tietämyksen ja laitetekniikan pohjalta. Valistusnäkökulma on siten jätetty tietoisesti pois.

Oppikirja on jaettu kahteen osaan, jotka julkaistaan eri niteinä. Ensimmäisen osan ensimmäinen luku käsittelee lainsäädännöllisiä asioita ja siinä on esitetty lyhyesti palonsyyn tutkimuksen juridiset perusteet Suomessa. Toisessa luvussa käsitellään suppeasti tulipaloissa tapahtuvia luonnontieteellisiä ilmiöitä eli palon fysiikkaa ja kemiaa. Kolmas luku koskettelee palopaikan dokumentointia ja näytteenottoa palojäännöksistä. Neljännessä luvussa keskitytään melko laajasti tärkeään syytymiskohdan etsimiseen ja tutkimiseen. Luvussa viisi paneudutaan syytymissyiden selvittämiseen. Luku kuusi käsittelee palon kehittymistä rakennuksessa ja palojen rekonstruktioita sekä numeerisin että fyysisin menetelmin. Luvussa seitsemän kuvataan ajoneuvopalojen ja luvussa kahdeksan kaasupalojen tutkintaa. Luku yhdeksän esittelee räjähdyksiä, luku kymmenen maastopaloja ja luku yksitoista palokuolemia tilastojen, kuolinsyiden selvittelyn ja palokuolemien tutkimuksen kannalta. Lopussa on laaja lähdeluettelo luotettavaan alan kansainväliseen kirjallisuuteen. Liitteeksi on taulukoitu muistilista palonsyyn selvittämisen tueksi.

Oppikirjan toisessa osassa esitetään palavien aineiden ominaisuuksia, laboratorio-menelmiä, sähköjohtojen ja -kytkimien vaurioiden tutkimisen kirjallisuuskatsaus, tulipalojen kuvauksia, luettelo Suomen merkittävistä tulipaloista sekä projektissa tehdyn kirjallisuushaun aikana löydetty palon syyn selvittämiseen liittyvä aineisto.

Palopaikalla suoritettavan toiminnan tueksi on oppikirjasta tiivistetty palopaikkaan, palotapahtumiin sekä palopaikalla löytyviin jälkiin liittyviä seikkoja. Nämä esitetään erillisessä niteessä ”Toiminta palopaikalla”.

Työn suurena haasteena on ollut poimia alan runsaasta kirjallisesta tarjonnasta lähteet, joiden tietoon voi riittävästi luottaa. Koska mahdollisten tapahtumien kirjo on erittäin laaja, useista asioista ei ole kirjallisuudessa aina riippumatonta tietoa.

Tässä suppeassa esityksessä luonnontieteellisiin seikkoihin ei ole voitu mennä syvällisesti, koska teksti on haluttu pitää luettavana edellyttämättä syvällisiä ennakkotietoja. Siksi matemaattisia kaavoja tai muuta teknistä tietoa on esitetty vain suppeasti, ja kirjallisuusviittauksilla on luotu linkki alan erikoistietämykseen.

Ylikomisario Esko Peltola Poliisiopistosta on kirjoittanut ensimmäisen osan luvun 1, kohdat 3.7 ja 11.4, rikoskemisti Niina Viitala Keskusrikospoliisista ensimmäisen osan kohdat 3.6.1, 4.5 ja 9.3.6 sekä toisen osan kohdat 2.1 ja 2.2, rikosinsinööri Kai Sjöholm Keskusrikospoliisista ensimmäisen osan kohdan 3.6.2

sekä fil. maist. Matti Hirvensalo Borealis Polymers Oy:stä toisen osan kohdat 4.3.1 ja 4.3.2. Näihin teksteihin kannessa mainitut tekijät ovat tehneet pääasiassa toimituksellisia muutoksia.

Työtä ovat rahoittaneet sisäasiainministeriön poliisiosasto ja Palosuojelurahasto, Palotutkimusraati sekä VTT. Projektin johtoryhmään ovat kuuluneet ylikomisario Erkki Haaksiluoto (Sisäasiainministeriön poliisiosasto, puheenjohtaja), yli-insinööri Jyrki Karvonen (Sisäasiainministeriön pelastusosasto) sekä vahinkovakuutusjohtaja Veli Matti Ojala (Suomen vakuutusyhtiöiden keskusliitto). Projektin tukiryhmään ovat kuuluneet ylikomisario Esko Peltola (Poliisiopisto), komisario Tuomo Saari (Poliisiopisto), rikosylikonstaapeli Kari Laattala (Helsingin poliisilaitos), rikosvahinkotarkastaja Atte Ramsland (Suomen vakuutusyhtiöiden keskusliitto), koulutuspäällikkö Markku Grönlund (Suomen Palopäällystöliitto ry.), palopäällikkö Olli-Pekka Ojanen (Turun pelastuslaitos), johtava palotarkastaja Seppo Männikkö (Tampereen pelastuslaitos), johtava palotarkastaja Yrjö Vorne (Espoon pelastuslaitos) sekä suunnittelija Heikki Viitala (Turvatekniikan keskus).

Kiitämme johtoryhmän ja tukiryhmän jäseniä sekä kollegoitamme VTT Rakennustekniikassa hyvistä neuvoista, käytännön avusta ja rohkaisusta. Ulkomaisista yhteistyökumppaneistamme antoivat hyvin merkittävää apua Ms. Nora Jason, NIST, Building and Fire Research Laboratoryn kirjastonhoitaja, tohtori Robert S. Levine samasta laitoksesta, professorit James G. Quintiere ja Frederick W. Mowrer, Faculty of Fire Protection Engineering, University of Maryland, tohtori John A. Rockett, eläkkeellä oleva palotutkijapioneeri Washingtonista, sekä Harold E. Nelson, Hughes Associates, MD, USA. Japanin palonsyyn tutkinnasta saimme yksityiskohtaista tietoa ja runsaasti hyödyllistä aineistoa, kun Yasuaki Hagimoto, National Research Institute of Police Science, Tokio, oli vaihtotutkijana VTT:ssä kuukauden keväällä 1996. Lisäksi olemme kiitollisia useille kollegoillemme Pohjoismaiden, Britannian, Saksan, Ranskan, Kanadan ja Espanjan palotutkimuslaitoksista käyttöömmme lähetetystä materiaalista sekä tiedoista palonsyyn tutkimuksen järjestämisestä näissä maissa.

Palonsyyn selvittäminen vaatii usein niin monien eri alojen taitoja, että parin henkilön ei ole mahdollista kattaa koko kenttää. Saumaton, avoin yhteistyö eri tahojen kanssa johtaa parhaimpaan tulokseen. Myös kirjan kirjoittamisessa tämä näkökulma on tullut esiin. Erityisesti haluamme kiittää kaikkia avustajakirjoittajia heidän ammatillisesta panoksestaan. Otamme mielellämme vastaan palautetta kirjan lukijoilta, sekä kritiikkiä että parannusehdotuksia.

Espoossa lokakuussa 1997

Tekijät

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
ALKUSANAT.....	4
JOHDANTO.....	11
1. LAINSÄÄDÄNNÖLLISET ASIAT.....	12
1.1. PALORIKOKSET.....	12
1.1.1. Tuhotyö (RL 34:1; L 21.4.1995/578).....	12
1.1.2 Törkeä tuhotyö (RL 34:3).....	12
1.1.3 Yleisvaaran tuottamus (RL 34:7).....	13
1.1.4. Törkeä yleisvaaran tuottamus (RL 34:8).....	13
1.1.5. Yleisvaarallisen rikoksen valmistelu (RL 34:9).....	13
1.1.6 Perätön vaarailmoitus (RL 34:10).....	13
1.1.7 Vakuutuspetos (RL 36:4 ; L 24.8.1990/769).....	13
1.1.8 Vahingonteko (RL 35:1; L 284.8.1990/769).....	14
1.1.9 Törkeä vahingonteko (RL 35:2).....	14
1.1.10 Lievä vahingonteko (RL 35:3).....	14
1.2 TUTKINTAVELVOLLISUUS PALONSYYN TUTKINNASSA.....	15
1.2.1 Poliisin tutkintavelvollisuus.....	15
1.2.2 Muiden viranomaisten tutkintavelvollisuus.....	16
1.2.3 Jokamiehen oikeudet.....	17
2. PALAMISEN EDELLYTYKSET JA PALON KEHITTYMINEN.....	18
2.1 PALAMISEN EDELLYTYKSET.....	18
2.1.1 Hapettumisen yleiset edellytykset.....	20
2.1.2 Palamisreaktioiden luonne.....	23
2.1.3 Hapettumisreaktion nopeus.....	25
2.2 PALON SYTTYMINEN, KEHITTYMINEN JA LEVIÄMINEN.....	26
2.2.1 Palon syttyminen.....	26
2.2.2 Palon kehittyminen.....	30
2.2.3 Palon leviäminen.....	32
2.3 KAASUJEN JA NESTEIDEN PALAMINEN.....	34
2.3.1 Palamisnopeus ja liekkirintaman etenemisnopeus.....	34
2.3.2 Liekin leviäminen kaasussa.....	37
2.3.3 Liekin leviäminen nesteen pinnassa.....	38
2.3.4 Nestepinnan alenemisnopeus.....	38
2.4 KAASURÄJÄHDYKSET.....	39
2.4.1 Yleinen palorintaman teoria.....	39
2.4.2 Räjähdyksen luokittelu.....	41

3. PALOPAIKKA, SEN DOKUMENTOINTI JA NÄYTTEENOTTO	45
3.1 TYÖTURVALLISUUS	45
3.1.1 Yleistä.....	45
3.1.2 Rakennuksen tai sen osien sortuminen.....	45
3.1.3 Sähköön liittyviä asioita	46
3.1.4 Kaasut, höyryt, pölyt sekä räjähdykset.....	46
3.2 OLEMASSA OLEVAT TIEDOT.....	47
3.3 VALOKUVAUS.....	48
3.3.1 Yleistä.....	48
3.3.2 Kuvien ottaminen	50
3.4 MUISTIINPANOT	54
3.5 PIIRUSTUKSET.....	55
3.6 FYYSISET TODISTEET, NÄYTTEIDEN OTTAMINEN	59
3.6.1 Palopaikkatutkintaan liittyvät kemialliset näytteet.....	59
3.6.2 Muut näytteet.....	63
3.7 SILMINNÄKIJÖIDEN JA MUIDEN HENKILÖIDEN HAASTATTELU	66
4. SYTTYMISKOHDAN TUTKIMINEN	68
4.1 PALOJÄLJET	68
4.1.1 Vaakasuorien tasojen läpäisy.....	69
4.1.2 Puun kulumisen palamisen aikana	70
4.1.3 Hiiltyminen.....	70
4.1.4 Kappaleiden murtuminen	73
4.1.5 Hapettuminen	75
4.1.6 Materiaalien sulaminen	75
4.1.7 Lämpölaajeneminen ja materiaalien muodonmuutokset.....	78
4.1.8 Savu ja noki	78
4.1.9 Ikkunalasit	80
4.1.10 Kokonpaineet kalusteiden jouset.....	85
4.2 PALOJÄLKIEKSIEN SIJAINNI JA MUOTO.....	85
4.2.1 Palojäljen matalin kohta	86
4.2.2 Palojälkien muoto	88
4.3 ESIMERKKEJÄ PIENEN HUONEEN PALOJÄLJISTÄ VALVOTUISSA OLOSUHTEISSA	93
4.4 SYTTYMISKOHTA.....	100
4.4.1 Yleistä.....	100
4.4.2 Palovaurioiden arviointi	100
4.4.3 Palopaikan alustava tutkiminen.....	101
4.4.4 Alustava paloskenaario.....	102
4.4.5 Yksityiskohtainen palopaikan tutkiminen	103
4.4.6 Palopaikan raivaus.....	105
4.4.7 Palopaikan ennallistaminen.....	106
4.4.8 Palotilanteen arviointi ja syttymiskohdan määrittäminen	107
4.5 KEMIALLISET MENETELMÄT PALAVIEN NESTEIDEN TOTEAMISEKSI	108
4.5.1. Palavat nesteet	108
4.5.2 Kaupalliset tuotteet.....	109

4.5.3 Näytteen esikäsittely.....	111
4.5.4 Kaasukromatografianalyysi	111
4.5.5 Massaspektrometrianalyysi	113
4.5.6 Trap-TD-GC-MS-menetelmä	114
5. SYTTYMISSYYN TUTKIMINEN	116
5.1 YLEISTÄ.....	116
5.1.1 Johdanto.....	116
5.1.2 Syttymislähde	116
5.1.3 Ensiksi syttyvä aine	118
5.1.4 Syttymissyy	118
5.1.5 Lausuntojen luotettavuus.....	119
5.2 LÄMMITTÄMINEN, RUOANLAITTO JA VALAISTUS.....	119
5.2.1 Lämmittäminen.....	119
5.2.2 Savuhormit	120
5.2.3 Ruoanlaitto	121
5.2.4 Valaistus	121
5.3 SÄHKÖTEKNISET SYYT	123
5.3.1 Yleistä.....	123
5.3.2 Oikosulut, maasulut ja valokaaret	125
5.3.3 Liitoskohdan huono kosketus (kuumat liitokset, löysät liitokset).....	130
5.3.4 Ylikuumentuneet sähköjohdot (ylikuormitus).....	131
5.3.5 Staattinen sähkö, salama.....	132
5.3.6 Sähköisten palonsyiden tutkiminen.....	135
5.3.7 Paloa aiheuttavia sähkölaitteita	139
5.4 LAITEVIAT	140
5.4.1 Yleistä.....	140
5.4.2 Vialliset sähkölaitteet	140
5.4.3 Kitkan aiheuttamat syyt.....	141
5.4.4 Palavien kaasujen ja nesteiden jakeluverkot ja laitteet.....	141
5.5 AVOIMET LIEKIT JA KIPINÄT	142
5.5.1 Tulityöt	142
5.5.2 Muut	144
5.6 TUPAKOINTIIN JA TUPAKOITSIJAN VÄLINEISIIN LIITTYVÄT SYYT.....	144
5.6.1 Yleistä.....	144
5.6.2 Savukkeet	144
5.6.3 Tulitikut.....	145
5.7 TAHALLAAN SYTYTETYT PALOT	146
5.7.1 Tahallaan sytytettyjen palojen tutkiminen.....	146
5.7.2 Tuhopoltot ja -polttajat.....	146
5.7.3 Vertailua ulkomaisiin selvityksiin.....	158
5.8 ITSESYTTYMINEN JA SYTTYMINEN KUUMASTA KAPPALEESTA	160
5.9 KEMIAALLISET REAKTIOT	165
5.10 TUULI, SADE, TULVAVESI.....	171
5.11 ELÄIMET	171
5.12 MUUT.....	172

5.12.1 Auringonvalo	172
6. PALON KEHITTYMINEN.....	174
6.1 PALOTAPAHTUMIEN AJOITTAMINEN.....	174
6.2 PALON KEHITTYMINEN RAKENNUKSESSA	179
6.3 PALOTAPAHTUMIEN REKONSTRUOINTI	179
6.3.1 Palon numeerinen simulointi.....	179
6.3.2 Kokeelliset palorekonstruktio.....	192
7. AJONEUVOPALOT	197
7.1 YLEISTÄ.....	197
7.2 LIIKKUVIEN AUTOJEN PALOT	198
7.3 AUTOPALOT ONNETTOMUUSTILANTEISSA.....	200
7.4 PYSÄHTYNEIDEN AUTOJEN PALOT JA NIIDEN TUTKIMINEN .	200
7.4.1 Yleistä.....	200
7.4.2 Auton tutkiminen.....	202
7.5 KUORMA-AUTOT JA REKAT	207
8. KAASUPALOT.....	209
8.1 YLEISTÄ KAASUISTA	209
8.2 KAASUPALOJEN SELVITTÄMINEN	211
8.2.1 Kaasun syttyminen	211
8.2.2 Putkistovuodot.....	211
8.2.3 Käytölaitteet	212
8.2.4 Kaasupalon selvittäminen.....	212
9. RÄJÄHDYKSET.....	214
9.1 YLEISTÄ.....	214
9.2 MEKAANISET RÄJÄHDYKSET	215
9.3 KEMIALLISET RÄJÄHDYKSET	216
9.3.1 Johdanto.....	216
9.3.2 Yleistä palamisräjähdyksistä	217
9.3.3 Palavat kaasut ja palavien nesteiden höyryt	218
9.3.4 Pölyt.....	220
9.3.5 Pyrolyysituotteet ja epätäydellisen palamisen palamistuotteet ...	223
9.3.6 Räjähdysaineet.....	223
9.4 RÄJÄHDYKSEN VAIKUTUKSET	230
9.4.1 Luokitus vaurioiden mukaan	230
9.4.2 Räjähdys seuraukset.....	230
9.4.3 Räjähdys seurauksiin vaikuttavat seikat	233
9.4.4 Räjähdyskeskus	235
9.5 RÄJÄHDYSPAIKAN TUTKIMINEN.....	236
9.5.1 Yleistä.....	236
9.5.2 Räjähdyspaikan ensiarviointi.....	237
9.5.3 Yksityiskohtainen arviointi	239
9.5.4 Syttymiskohta ja polttoaine	242
9.5.5 Syttymissy	244

10. MAASTOPALOT	245
10.1 YLEISTÄ.....	245
10.2 MAASTOPALON KULKUUN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT.....	246
10.3 MAASTOPALON TUTKIMINEN	247
10.3.1 Yleistä.....	247
10.3.2 Toiminta palopaikalla ja leviämisiäjäljet	248
10.3.3 Maastopalon syttymissyitä	252
11. PALOKUOLEMAT	254
11.1 TILASTOJA	254
11.2 KUOLINSYYT.....	260
11.2.1 Myrkytys.....	260
11.2.2 Altistuminen lämmölle.....	263
11.2.3 Muut syyt.....	264
11.3 IHMISTEN KÄYTTÄYTYMINEN TULIPALOISSA.....	264
11.4 PALOKUOLEMIEN TUTKINTA	265
11.4.1. Tutkintajärjestelmä.....	265
11.4.2. Tutkinnassa selvitettävät asiat.....	265
11.4.3. Suojaamistoimet.....	266
LÄHDELUETTELO	267
HAKEMISTO.....	280

LIITE

Muistilista palonsyyn selvittämisen tueksi

JOHDANTO

Sekä tahallaan sytytettyjen että muiden tulipalojen syyn perusteellinen selvittäminen on oleellista sekä ihmisille että omaisuuden suojelulle. Palonsyy tulisi voida selvittää luotettavasti sekä taloudellisten intressien että henkilöiden oikeusturvan kannalta. Palonsyyn tarkka selvittäminen voi esimerkiksi parantaa vaarallisten teollisten prosessien, toimintojen tai varastoinnin työ- ja käyttöturvallisuutta, lisätä kotitalouksien paloturvallisuutta, edistää rikosten selvittämistä sekä antaa lisää tietoa palon perusilmiöiden ymmärtämiseksi.

Tässä teoksessa esitetään tämänhetkinen (vuoden 1997) tietämys palonsyyn selvittämisestä. Paloalan tutkimus edistyy koko ajan, ja uutta tietoa sekä uusia menetelmiä ilmestyy. Myös palonsyyn selvittämiseksi tulee uusia näkökulmia. Kuitenkin palon perusluonne luonnontieteellisenä ilmiönä säilyy pääosin samanlaisena, joten valtaosa tämän kirjan aineistosta lienee käyttökelpoista vielä pitkään.

Paloympäristö, palotapahtumat ja palojäljet vaihtelevat suuresti tulipalosta toiseen. Samoja peruseriaatteita, jotka perustuvat tulipaloon luonnontieteellisenä ilmiönä, voidaan kuitenkin soveltaa eri palokohteisiin. Palonsyyn tutkijan tieto ja kokemus ratkaisevat käytännössä usein, selviääkö palonsyy. Tämän kirjan tarkoituksena on tukea ja edistää palonsyyn selvittämistyötä mahdollisimman monipuolisesti poliisin ja operatiivisen palontorjuntahenkilöstön kenttätyöstä tutkimuslaitosten selvityksiin saakka.

1. LAINSÄÄDÄNNÖLLISET ASIAT

1.1. PALORIKOKSET

1.1.1. Tuhotyö (RL 34:1; L 21.4.1995/578)

Rikoslain kokonaisuudistuksen myötä uudistettiin rikoslain 34. luku yleisvaarallisista rikoksista. Vanha perusrikos murhapolito muuttui tuhotyöksi, jonka rangaistavuus on sanktioitu lievemmin kuin aikaisemmin. Samalla muuttui rikoksen tunnusmerkistö siten, että nyt mikä tahansa kohde, joka sytytetään tuleen siten, että teko on omiaan aiheuttamaan yleistä hengen tai terveyden vaaraa tai tuleen sytyttämisestä on yleistä erittäin huomattavaa taloudellisen vahingon vaaraa, täyttää tuhotyön perustunnusmerkistön.

Tuhotyö on tyypillinen vaarantamisrikos eli rangaistavuus ei edellytä vahingon syntymistä; riittävää on yleisen vaaratilanteen syntyminen. Yleisen hengen tai terveyden vaaran osalta riittää abstraktinen mahdollisuus vaaran syntymiseen.

"On omiaan" -lauseke tarkoittaa sitä, että esimerkiksi perheen asunnon sytyttäminen tuleen on tuhotyö, vaikka perhe ei juuri tuolloin olekaan ollut kotona. Säännöstä ei sitä vastoin voida soveltaa, jos tekijä on ennen tulen sytyttämistä tarkkaan varmistunut siitä, että kukaan ei joudu vaaraan.

Pykälän tarkoittaman yleisen erittäin huomattavan taloudellisen vahingon syntymisvaaran pitää olla konkreettinen. Rikoksentekijän tahallisuuden on ulotuttava molempiin suojeltaviin oikeushyviin.

Tuhotyö voidaan tuleen sytyttämisen sijasta suorittaa myös räjähdystarvikkeita käyttäen. Rikokseen syyllistynyt voidaan tuomita vankeuteen vähintään neljäksi kuukaudeksi ja enintään neljäksi vuodeksi. Teon yritys on myös rangaistava.

1.1.2 Törkeä tuhotyö (RL 34:3)

Törkeä tuhotyö on tuhotyön kvalifioitu muoto. Rangaistavuus edellyttää, että teko tehdään

- 1) aiheuttaen suurelle ihmismäärälle vakavaa hengen tai terveyden vaaraa,
- 2) aiheuttaen jollekin yhteiskunnan tärkeälle toiminnolle uhkaavan vahingon pitkäaikaisuuden tai laaja-alaisuuden vuoksi taikka muusta syystä erityisen vakavaa vaaraa
- 3) taikka teko tehdään sodan tai muiden poikkeusolojen aikana. Lisäksi edellytetään vielä, että rikos on kokonaisuutena arvostellen törkeä. Toisin kuin tuhotyössä, tässä kvalifioidussa rikoksessa vakavan vaaran aiheuttamisen täytyy myös olla konkreettista.

Rikokseen syyllistynyt voidaan tuomita vankeuteen vähintään 2 vuodeksi ja enintään kymmeneksi vuodeksi.

Teon yritys on rangaistava.

1.1.3 Yleisvaaran tuottamus (RL 34:7)

Yleisvaaran tuottamus on tuhotyön tuottamuksellinen tekomuoto, jossa tekijän tahallisuus ei ulotu vaaran aiheuttamiseen. Itse teko, siis tuleen sytyttäminen tai räjäyttämisen, voi sitä vastoin olla joko tahallinen tai tuottamuksellinen. Vaaran aiheuttaminen tapahtuu kuitenkin tuottamuksesta.

Yleisvaaran tuottamukseen liittyy mahdollisuus välttää rangaistus omalla toiminnalla. Jos rikoksentekijä poistaa vaaran, ennen kuin vaaratilanteesta on aiheutunut olennaista vahinkoa, voidaan syyte häntä vastaan jättää ajamatta tai hänet voidaan jättää tuomitsematta rangaistukseen.

1.1.4. Törkeä yleisvaaran tuottamus (RL 34:8)

Törkeä yleisvaaran tuottamus on yleisvaaran tuottamuksen törkeä tekomuoto. Tunnusmerkistö edellyttää, että yleisvaaran tuottamuksessa aiheutetaan suurelle ihmismäärälle vakavaa hengen tai terveyden vaaraa. Tunnusmerkistö on seurauspainotteinen, koska ratkaisevaa on tuotettu vaara eikä niinkään tuottamuksen aste. Vaaran on oltava konkreettinen ja vahingon todennäköisyyden olennainen sekä vahingon määrän merkittävä.

1.1.5. Yleisvaarallisen rikoksen valmistelu (RL 34:9)

Tuhotyörikoksen on katsottu olevan yhteiskunnalliselta vaarallisuudeltaan niin huomattava, että poikkeuksellisesti sen valmistelukin on säädetty rangaistavaksi. Rikoksen valmisteluun syyllistyy henkilö, joka pitää hallussaan räjähdettä taikka vaarallista laitetta tai ainetta tarkoituksenaan suorittaa tuhotyö tai törkeä tuhotyö. Hallussapidon täytyy siis liittyä tahalliseen aikomukseen tehdä ko. rikos.

1.1.6 Perätön vaarailmoitus (RL 34:10)

Perättömään vaarailmoitusrikokseen syyllistyy henkilö, joka tekee perättömäksi tietämänsä ilmoituksen pommista tai tulipalosta siten, että se on omiaan aiheuttamaan pelastus- tai turvallisuustoimen taikka pakokauhua. Teon ei täytyäkseen tarvitse aiheuttaa pelastustoimien käynnistymistä. Suojeluobjektina tässä rikoksessa on yleinen turvallisuus.

1.1.7 Vakuutuspetos (RL 36:4 ; L 24.8.1990/769)

Henkilö, joka hankkiakseen itselleen tai toiselle oikeudettoman vakuutuskorvauksen sytyttää tuleen palovakuutetun omaisuuden, syyllistyy vakuutuspetokseen. Tunnusmerkistö täyttyy minkä tahansa omaisuuden sytyttämisellä, kunhan se on palovakuutettu. Omaisuuden ei tarvitse olla sytyttäjän omaa.

Vakuutuspetos on tavallisen petoksen esiteko, eli jos palovakuutetun omaisuuden vahingosta tehdään myöhemmin vahingonkorvausvaatimus vakuutusyhtiölle, petoksen yritys täyttyy ja vakuutuspetos jää näin rankaisemattomaksi.

Jos palovakuutettu omaisuus on sellainen, että se sopii myös jonkun toisen rikoksen, esimerkiksi tuhotyön objektiksi, tekijä syyllistyy tietysti myös tähän rikokseen.

1.1.8 Vahingonteko (RL 35:1; L 284.8.1990/769)

Henkilö, joka sytyttää tuleen sellaista omaisuutta, joka ei täytä tuhotyörikoksen tunnusmerkistöä, saattaa syyllistyä vahingontekoon. Vahingonteon objektiksi sopii mikä tahansa omaisuus eikä teon tarvitse aiheuttaa yleistä tai yksityistä vaaraa. Jos teolla on loukattu vain yksityistä omaisuutta, ei syyttäjä saa nostaa asiassa syytettä kuin vain asianomistajan vaatimuksesta. Teon rangaistavuus vaatii tekijältään tahallisuutta. Tuottamuksellisesta vahingonteosta tekijä voidaan tuomita vain vahingonkorvaukseen.

Vahingonteosta voidaan tuomita sakkoon tai vankeuteen enintään yhdeksi vuodeksi.

1.1.9 Törkeä vahingonteko (RL 35:2)

Jos vahingonteolla aiheutetaan

- 1) erittäin suurta taloudellista vahinkoa,
- 2) rikoksen uhrille tämän olot huomioon ottaen erityisen tuntuva vahinkoa taikka
- 3) historiallisesti tai sivistyksellisesti erityisen arvokkaalle omaisuudelle huomattavaa vahinkoa ja vahingonteko on myös kokonaisuutena arvostellen törkeä, rikoksentekijä on tuomittava vankeuteen vähintään neljäksi kuukaudeksi ja enintään neljäksi vuodeksi. Törkeä vahingonteko on aina virallisen syytteen alainen, eikä siis vaadi asianomistajan syytevaatimusta. Teko on vain tahallisen rangaistava. Rangaistusasteikko on sama kuin tavallisessa tuhotyörikoksessa.

1.1.10 Lievä vahingonteko (RL 35:3)

Jos vahingonteko, huomioon ottaen vahingon vähäisyys tai muut rikokseen liittyvät seikat, on kokonaisuutena arvostellen vähäinen, rikoksentekijä on tuomittava sakkoon. Teon rangaistavuus edellyttää tahallisuutta ja asianomistajan syytevaatimusta.

Vahingontekoa koskevia säännöksiä sovelletaan myös sellaiseen yhteiseen omaisuuteen, jossa rikoksentekijällä on osuus, esimerkiksi asunto-osakkeeseen.

Vahingontekorikoksia koskevat säännökset ovat toissijaisia. Jos teosta on muualla laissa säädetty yhtä ankara tai ankarampi rangaistus, ei vahingontekopykälä saa

soveltaa. Esimerkiksi jos teko täyttäisi sekä tuhotyön, että törkeän vahingonteon tunnusmerkistön, on tekoon sovellettava tuhotyörikoksen säännöksiä.

Vanhan murhapolttorikoksen tunnusmerkistön alaisista teosta vain pieni osa siirtynyt uuden tuhotyörikoksen piiriin. Suurin osa entisistä murhapoltoista luokitellaan nykyään vahingonteoiksi. Tyypillisiä tuleen sytyttämällä tehtyjä vahingontekoja ovat sellaisten kohteiden, kuten autojen, muiden kulkuneuvojen, tyhjiällä olevien varastojen ja tilojen sytyttämiset, joista ei ole ollut yleistä vaaraa tai tekijä on varmistunut ennakkoon kohteen olevan tyhjä ihmisistä. Toisaalta on huomattava, että jos esimerkiksi auto sytytetään tuleen siten ja sellaisissa olosuhteissa, että palo on omiaan aiheuttamaan viereisen rivitalon asukkaille yleistä hengen tai terveyden vaaraa, rikosentekijä syyllistyy tuhotyörikokseen tai sen yritykseen.

1.2 TUTKINTAVELVOLLISUUS PALONSYYN TUTKINNASSA

1.2.1 Poliisin tutkintavelvollisuus

1.2.1.1 ESITUTKINTA RIKOKSEN JOHDOSTA (ESITUTKINTALAKI 2 §; 30.4.1987/449)

Esitutkintalaki määrää, että poliisin on suoritettava asiassa esitutkinta, jos sille tehdyn ilmoituksen perusteella tai muutoin on syytä epäillä, että rikos on tehty. Tutkinnan käynnistämistä on laissa siis asetettu hyvin alas, syytä epäillä-tasolle.

Suomessa rakentaminen on mm. palo- ja sähköturvallisuuden osalta niin hyvin ja kattavasti normitettu, että voidaan sanoa melkein aina rikotun jotakin määräystä tai muuta säännöstä, jos tulipalo pääsee syttymään. Tämä tarkoittaa käytännössä palorikosten osalta sitä, että jos palolle ei löydy ns. luonnollista selitystä, on syytä epäillä tahallista tai ainakin tuottamuksellista rikosta.

Esitutkinnassa poliisi selvittää, mikä rikos on kyseessä, eli rikoksen tunnusmerkistön, ketkä jutussa ovat asianosaisia ja muut syytteestä päättämistä ja rikosasian oikeuskäyntiä varten tarvittavat seikat.

Esitutkinnassa poliisin käyttämistä pakkokeinoista, kuten kiinniottamisesta, pidättämisestä, takavarikoista yms., säättää pakkokeinolaki.

1.2.1.2 MUU POLIISIN TUTKINTAVELVOLLISUUS (POLIISILAKI 37 §; 7.4.1995/493)

Poliisin muusta kuin rikoksen johdosta suoritettavasta tutkinnasta, ns. poliisitutkinnasta, säädetään poliisilaissa. Poliisitutkinnan tarkoituksena on virallisen selvityksen hankkiminen ja kokoaminen muissa kuin rikosasioissa. Tällaisia laeissa olevia tutkintavelvoitteita on palonsyöntutkintojen osalta mm. seuraavissa tapauksissa:

Kuolemansyyntutkinta (Laki kuolemansyyntutkimuksesta 7 §; 1.6.1973/459)

Laki kuolemansyyntutkimuksesta jakaa kuolemansyyntutkimuksen lääketieteelliseen ja oikeuslääketieteelliseen kuolemansyyntutkimukseen. Oikeuslääketieteellinen kuolemansyyntutkimus tehdään esimerkiksi silloin kun kuoleman ei tiedetä johtuneen sairaudesta tai kuoleman on aiheuttanut rikos tai tapaturma tai kun on aihetta epäillä kuoleman johtuneen jostakin sellaisesta syystä tai kuolema muuten on tapahtunut yllättävästi. Tulipalokuolema kuuluu aina oikeuslääketieteellisen kuolemansyyntutkimuksen piiriin. Lain mukaan oikeuslääketieteellinen kuolemansyyntutkimus kuuluu poliisille. Tutkinnassa on tarvittaessa käytettävä lääkäriä apuna.

Työtapaturmatutkinta (Tapaturmavakuutuslaki 39 §; 1.10.1995/495)

Tapaturmavakuutuslaki määrää, että poliisin on suoritettava tutkinta, jos työtapaturman seurauksena on kuolema tai vaikealaatuinen vamma. Jos siis kuolema tai vaikealaatuinen vamma on syntynyt työssä tulipalon seurauksena, on poliisin tutkittava asia.

Räjähdysonnettomuuden tutkinta (Räjähdeasetus 28.5.1993/473)

Jos räjähdysonnettomuudessa tai räjähdettä valmistavassa tehtaassa tai räjähdetarastossa sattuneessa tulipalossa on seurauksena kuolema, vaikealaatuinen vamma taikka muu kuin vähäinen omaisuus- tai ympäristövahinko, räjähteen haltijan tai hänen edustajansa on ilmoitettava siitä tekniselle tarkastuskeskukselle ja poliisille. Tämä ilmoitusvelvollisuus tarkoittaa käytännössä sitä, että tulipalon syttymissyystä riippuen poliisi tulee suorittamaan asiassa joko esitutkiminnan tai poliisitutkiminnan.

1.2.2 Muiden viranomaisten tutkintavelvollisuus

Suuronnettomuus-, lento- ja raideliikenneonnettomuustutkintalautakunnat (Laki suuronnettomuuksien tutkinnasta 12.1.1996/6; laki onnettomuuksien tutkinnasta annetun lain muuttamisesta 31.1.1997 sekä asetus onnettomuuksien tutkinnasta annetun asetuksen (79/1996) muuttamisesta 31.1.1997)

Yleisen turvallisuuden lisäämiseksi ja onnettomuuksien estämiseksi suuronnettomuudet, sekä ilmailussa ja raideliikenteessä tapahtuneet onnettomuudet, siis myös tulipalo-onnettomuudet, taikka niiden vaaratilanteet tutkii valtioneuvoston kutakin tapausta varten erikseen asettama tutkintalautakunta tai oikeusministeriön alaisuudessa toimiva onnettomuustutkintakeskus. Onnettomuuksien tutkinnasta annetussa laissa säädetään tutkimuksen laajuudesta ja eri viranomaisten virka-apuvelvollisuudesta. Tutkintalautakunnalla on laajat itsenäiset oikeudet mm. onnettomuuspaikan eristyksen, näyttöiden ottamisen ja kuulustelujen suorittamisen suhteen. Tutkinta voidaan myös suorittaa yhteistoiminnassa samassa asiassa rikos- tai kuolemansyyntutkintaa suorittavan poliisin kanssa siinä laajuudessa kuin tutkintalautakunta katsoo yhteistoiminnan olevan onnettomuuden syyn tutkimuksen kannalta tarkoituksenmukaista. Tutkintalautakuntien jäsenet toimivat virkavastuulla.

Paloviranomaiset (Asetus palo- ja pelastustoimesta 31 §; 31.12.1975/1089)

Paloasetuksen mukaan, jos palon tai muun onnettomuuden yhteydessä ilmenee aihetta olettaa, että joku on sen tahallaan tai tuottamuksesta aiheuttanut, on paloviranomaisten ilmoitettava asiasta poliisiviranomaiselle. Paloviranomaiselle ei siis ole säädetty asiassa tutkintavelvollisuutta, ainoastaan ilmoitusvelvollisuus poliisille. Ilmoituksen saatuaan poliisi suorittaa asiassa joko esitutkinnan tai poliisitutkinnan tapauksesta riippuen.

Vakuutusyhtiöt (Vakuutusopimuslaki 28.6.1994/543)

Vakuutusopimuslaki määrittelee vakuutuksenantajan ja vakuutuksenottajan välisistä oikeuksista ja velvollisuuksista vahinkotapahtuman yhteydessä. Vakuutuksenottajan on ennen vakuutuksen myöntämistä annettava vakuutusyhtiön pyynnöstä oikeat ja täydelliset vastaukset vakuutusyhtiön esittämiin sellaisiin kysymyksiin, joilla voi olla merkitystä vakuutuksenantajan vastuun arvioimisen kannalta. Jos vakuutuksenottaja on tässä menetellyt vilpillisesti, ei vakuutusopimus enää sido vakuutuksenantajaa ja vakuutuskorvausta voidaan alentaa tai se evätä.

Vakuutusyhtiöiden oikeus tutkia vakuuttamiaan palovahinkotapahtumia perustuu vakuutusopimuslakiin ja sen perusteella tehtyyn vakuutusopimukseen. Suurimpiin vakuutusyhtiöihin on viime aikoina palkattu vakuutusetsiviä, joiden tehtävänä on mm. vakuutusvilppien ja epäselvien palovahinkojen selvittely. Jos selvittelyssä käy ilmi sellaisia seikkoja, joiden perusteella on syytä epäillä rikosta, vakuutusyhtiö voi tehdä asiasta rikosilmoituksen poliisille, jonka tehtävä on käynnistää esitutkinta asiassa. Vakuutusetsivillä ei ole esitutkinta- tai pakkokeino-oikeuksia jokamiehen kiinniotto-oikeutta lukuunottamatta.

Sähköturvallisuusviranomainen (Sähköturvallisuusasetus 20 §; 498/1996)

Sähköturvallisuusasetuksen mukaan poliisiin, palo- ja työsuojeluviranomaisen sekä verkonhaltijan on ilmoitettava sähköturvallisuusviranomaiselle sähkövahingosta, josta on aiheutunut vakava onnettomuus. Sähköturvallisuusviranomaisen on tutkittava onnettomuus, jos sähköturvallisuusviranomainen arvioi sen onnettomuuden syyn selvittämisen tai onnettomuuden ehkäisyn kannalta tarpeelliseksi.

1.2.3 Jokamiehen oikeudet

Kiinniotto-oikeus (Pakkokeinolaki 1 §; 17.2.1995/213)

Pakkokeinolaissa on ns. jokamiehen kiinniotto-oikeuspykälä, jonka mukaan jokainen saa ottaa kiinni verekseltä tai pakenemasta tavatun rikosentekijän, jos rikoksesta saattaa seurata vankeutta. Palopaikalla siis niin ohikulkija kuin sammutustyöntekijäkin saa ottaa verekseltään kiinni palon syyttäjän. Hänet on viipymättä luovutettava poliisille. Huomattakoon, että jokamiehen kiinniotto-oikeus ei anna valtuuksia suorittaa esimerkiksi sellaisia tutkintatoimia, joissa pakkokeinoja käyttäen puututtaisiin lailla suojattuihin oikeushyviin.

2. PALAMISEN EDELLYTYKSET JA PALON KEHITTYMINEN

Palon kehittymisestä on saatavissa kattavia oppikirjoja, joista käyttökelpoisimpia ovat Drysdalen (1985) jo klassiseksi muodostunut palotekniikan oppikirja, Kuon (1986) palamisen teoriaa käsittelevä ja Williamsin (1985) palamisen teorian matemaattisia perusteita käsittelevä kirja. Näistä teoksista on saatavissa selkeä kuva, mitä palamisesta luonnontieteellisenä ilmiönä tiedetään. Palamisen perusteiden kannalta kuva ei ole oleellisesti muuttunut kirjojen ilmestymisen jälkeisen vuosikymmenen aikana, vaikka palotekniikan muilla alueilla kehitys on ollut nopeaa. Palotekniikasta ja myös lyhyet katsaukset palamisen perusteista löytää SFPE:n laajasta käsikirjasta (DiNenno ym. 1995, Section 1 ja Section 2).

Suomenkielinen alan kirjallisuus on suppeaa ja painottunut polttotekniikkaan. Silti täysin käyttökelpoisia ovat Tekniikan käsikirjan 8. painoksessa olevat alaa sivuavat artikkelit, kuten professori Kurki-Suonion (1981) "Polttoaineet ja palaminen" sekä saman teossarjan professori Rytin artikkelit termodynamiikasta ja lämmönsiirron eri tyypeistä kirjan eri osissa. Tekniikan käsikirjan 8. painos, joka on jo pitkään ollut loppuunmyyty, on palonsyyn tutkijalle verraton aarreaitta luomalla suomen kielellä katsauksia tekniikan eri aloilla sovellettujen luonnonilmiöiden perusteisiin helpotajuisessa muodossa. Uusi nykyaikaisinta polttotekniikka käsittelevä suomenkielinen kirja on Raikon ym. (1995) toimittama "Poltto ja palaminen". Varsinaisesta palotekniikasta ei ole julkaistuja suomenkielisiä kokonaisesityksiä. Teknillisen korkeakoulun palotekniikan syventymiskohteen opetusta varten on laadittu muutamia luentomonistetasoisia raportteja palotekniikan eri osa-alueilta opiskelijoille jaettaviksi. Tämän jakson esitys pohjautuu osittain näiltä luennoilta saatuihin kokemuksiin, mutta erityisesti yleistajuisempiin, palotekniikan eri ryhmille pidettyjen täydennyskoulutus-esitelmien aineistoon, kuten vihkoseen "Palon kehittymisen perusteita" (Keski-Rahkonen 1986a).

2.1 PALAMISEN EDELLYTYKSET

Palossa polttoaine yhtyy happeen tuottaen palokaasuja ja energiaa. Tavalliset polttoaineet sisältävät hiiltä, vetyä ja happea. Siten reaktioyhtälö voidaan kirjoittaa sanallisesti (Drysdale 1985)

polttoaine + happi → vesi + hiilidioksidi + energiaa

Paloissa ja räjähdyksissä tapahtuu voimakkaasti lämpöenergiaa vapauttava reaktio. Tilanne on esitetty kaavamaisesti kuvassa 2.1. Oletamme reaktion yksinkertaiseksi



A ja B ovat kaasumaisina sekoittuneet keskenään ja alkavat reagoida, kun sytytysalueella lämpötila on noussut riittävän korkeaksi. Vapautuva energia lämmittää reaktiotuotteita C ja D sekä ympäröivää polttoaineseosta. Siten reaktio

etenee sytytyskohdasta tavallisesti ohuena rintamana. Sitä jatkuu kunnes polttoaine loppuu tai häviöt tulevat niin suuriksi, että reaktionopeus putoaa mitättömäksi.

Palamisessa syntyvän energian ja pääasiallisten palotuotteiden kannalta katsottuna palavat materiaalit voidaan jakaa kahteen suureen ryhmään: öljy- ja selluloosapohjaisiin aineisiin. Kirjoittamalla palavan aineen keskimääräinen alkuainesuhde kemiallisen bruttokaavan muotoon yhtä hiiliatomia kohden saamme öljytuotteille CH_2 ja selluloosapohjaisille aineille $CH_2O_{0,7}$ (Drysdale 1985). Öljytuotteiden täydellisen palamisen bruttoreaktiokaava on siten



ja vastaavasti selluloosaan pohjautuville aineille



Siten kummassakin tapauksessa palotuotteina on pelkkää hiilidioksidia ja vettä yksi molekyyli kumpaakin palanutta hiiliatomia kohden.

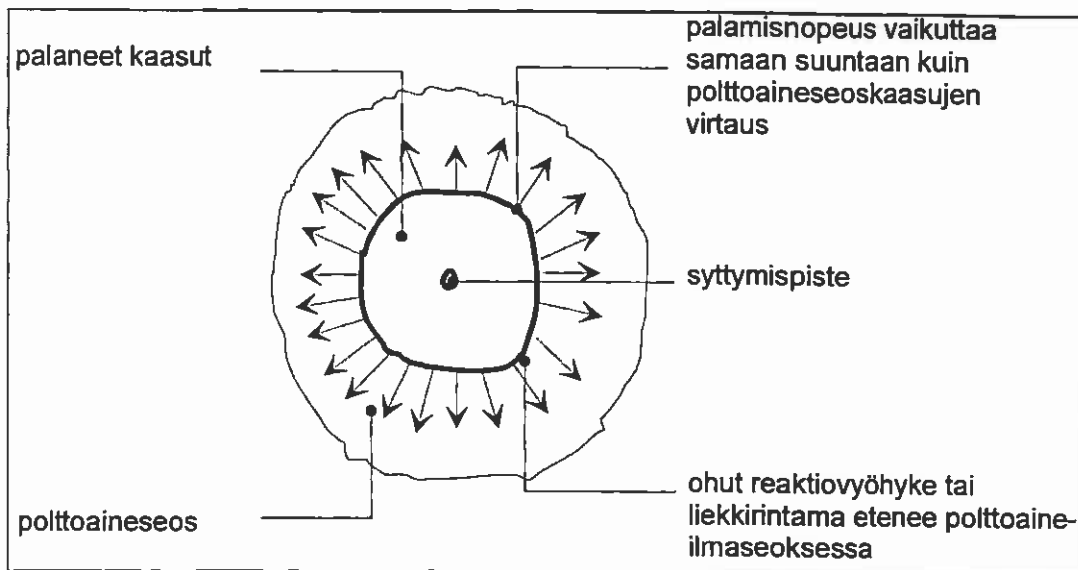
Todellisuudessa palaminen ei ole koskaan aivan täydellistä, ja itse reaktiot ovat aivan erilaisia, kuten kohdan 2.1.2 esimerkistä selviää. Epätäydellisessä palamisessa syntyy erilaisia kaasumaisia ja höyryinä olevia kemiallisia yhdisteitä, joiden lukumäärä voi olla hyvinkin suuri mutta joiden pitoisuudet ovat tavallisesti pieniä. Tavallisesti muista kaasumaisista tuotteista eniten syntyy hiilimonoksidia CO, joka voimakkaana myrkkynä on tärkein palokuolemien aiheuttaja (kohta 11.2.1). Määrällisesti eniten muista palotuotteista syntyy yleensä nokea, joka on pääasiassa pieniä, jähmeitä hiilihiukkasia sekä niihin tiivistyneitä tervamaisia, vasta melko korkeissa lämpötiloissa höyrystyviä yhdisteitä. Noen määrä voi olla jopa puolet kaikista palotuotteista. Kokonaan palamatta jäävät epäorgaaniset aineosat, "tuhka", ja osa hiilestä, jotka yhdessä muodostavat jähmeän palojäännöksen. Se on eri polttoaineilla erinäköistä ja sillä on perinteisesti eri palamistapahtumissa erilaisia nimiä; myös sen koostumus vaihtelee suuresti polttoaineen alkuainekoostumuksesta riippuen: puun palamisen tuhka, lamppujen ja moottorien karsta, kattiloiden kuona jne.

Kuvan 2.1. esimerkki on **esisekoitetusta** kaasuliekistä, joka käytännössä esiintyy mm. kaasupolttimessa, missä happi ja polttoaine sekoitetaan ennen suutinta. Myös räjähtävissä kaasuseoksissa molemmat reagoivat osat ovat sekoittuneet keskenään. Kynttilän liekki on esimerkki **diffuusiolielikistä**. Siinä polttoaine kaasuuntuu sydäimestä ja palamishappi diffusoituu ulkopuolelta (vrt. kohta 2.3.1).

Palamisreaktiossa vapautuva energiamäärä Q lasketaan kaavalla

$$Q = m H_a \quad (2)$$

missä m on täydellisesti palanut ainemäärä ja H_a tämän aineen **alempi palamislämpö** (syntynyt vesi on höyrynä). Suuruusluokka-arviona H_a on selluloosapohjaisille tuotteille n. 15 MJ/kg ja öljy- ja muovituotteille n. 40 MJ/kg.



Kuva 2.1. Palamisreaktion eteneminen esisekoitetussa kaasussa.

Kun palamista rajoittaa ilmansaanti, vapautuva energiamäärä voidaan laskea käytettävissä olevan ilmamäärän perusteella. Lähes kaikista polttoaineista energiaa vapautuu 3 MJ ilmakilogrammaa kohden.

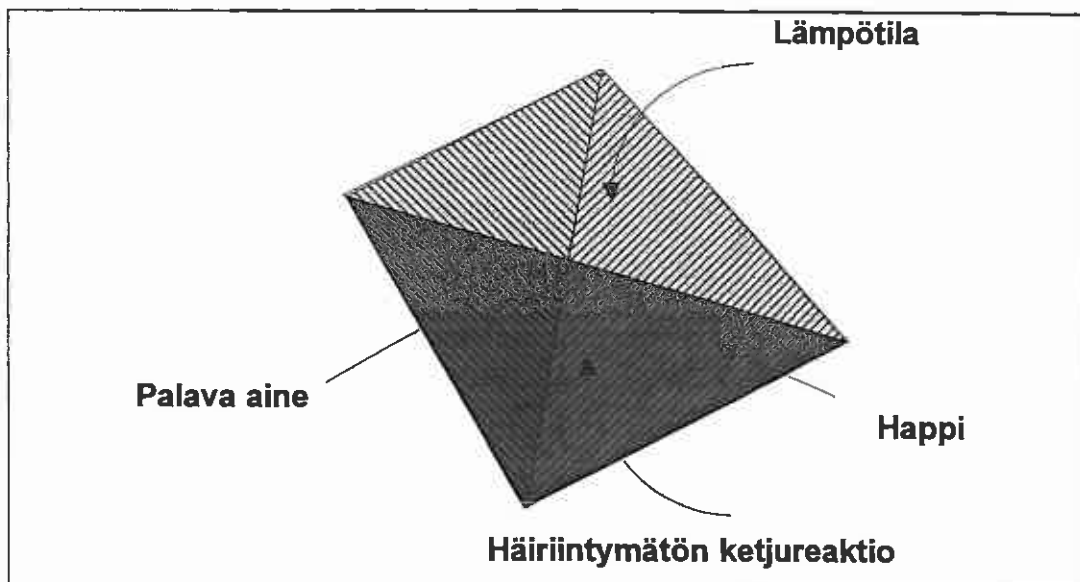
2.1.1 Hapettumisen yleiset edellytykset

Jotta palo syntyisi ja voisi edetä, tarvitsemme useita edellytyksiä, joiden on oltava voimassa samanaikaisesti. Jos yksikin edellytyksistä puuttuu, palo sammuu. Palontorjunnassa pyritään jonkin edellytyksen poistamiseen. Palaminen voi tapahtua liekehtivänä tai hehkuen.

Liekkipalossa on oltava samanaikaisesti saatavilla

- polttoaine
- happi (ilma)
- riittävä lämpötila
- häiriintymätön ketjureaktio (radikaalit).

Näitä ehtoja havainnollistaa kuvan 2.2 tetraedri. Kukin tahko edustaa yhtä yllämainittua ehtoa. Jos yksikin tahko puuttuu, palo ei voi edetä.



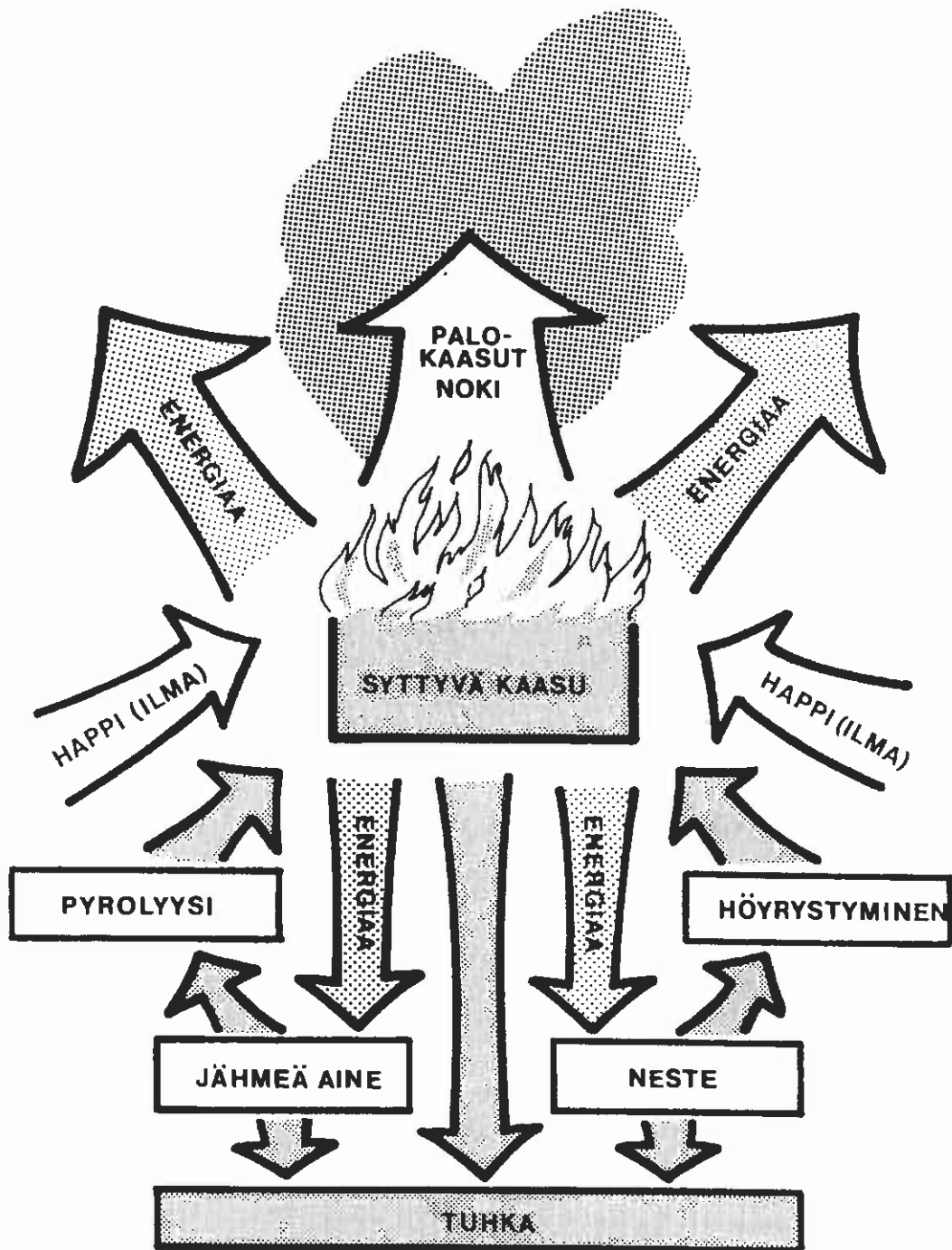
Kuva 2.2. Liekehtivän palon edellytykset.

Liekehtien voivat palaa kaikissa olomuodoissa olevat aineet. Kuva 2.3 havainnollistaa tapahtumia eri olomuodoissa (Keski-Rahkonen 1986a). Palamisreaktiot tapahtuvat aineen ollessa kaasua. Siten kaasut ja höyryt voivat palaa suoraan, kun niihin on sekoittunut riittävästi happea. Paloteho riippuu saatavilla olevan polttoaineen ja hapen määrästä.

Nestemäisenä olevan polttoaineen on ensin höyrystyttävä, ja palaminen tapahtuu vasta höyrynä. Nesteen höyrystyminen sitoo huomattavan energiamäärän, joka tulee nesteen pinnalle (lammikko, valuva pinta vinolla alustalla tai pisarat) liekeistä. Paloteho määräytyy yleensä höyrystymisnopeudesta.

Jähmeän aineen palamista edeltää niiden suurten molekyylien pilkkoutuminen, pyrolyysi. Tällöin syntyvät riittävän keveät molekyylit tunkeutuvat kaasuna ja höyrynä aineen ulkopuolelle, ja taasen palaminen tapahtuu kaasuna. Pyrolyysiin käynnistyy vasta jähmeän aineen lämmentyä huomattavasti. Palamisen jatkuessa energia tähän tulee liekeistä, ja palamisnopeus määräytyy pyrolyysinopeudesta.

Palaminen ei ole täydellistä. Jähmeistä palot tuotteista palokaasujen mukana kulkeutuu noki ja epäorgaaniset aineet muodostavat "tuhkan", millä tässä tarkoitetaan kaikkea polttoaineen paikalle jäävää palamatonta jähmeää ainetta.

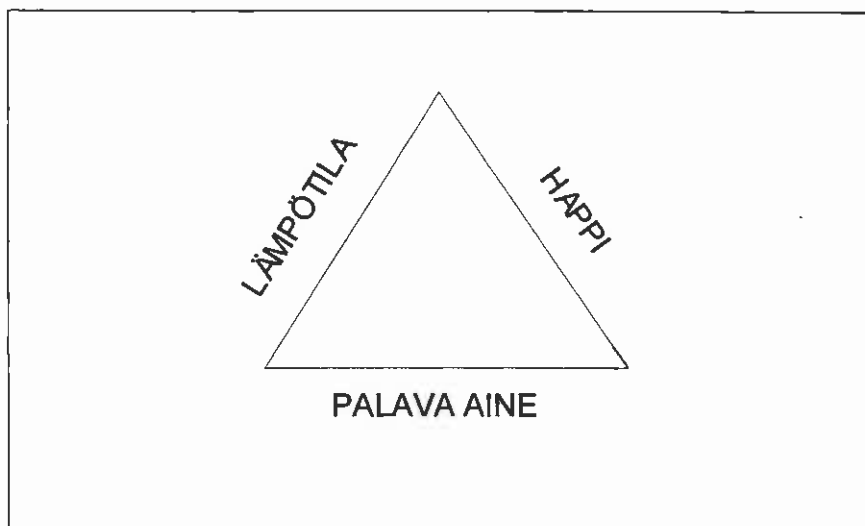


Kuva 2.3. Liekehtivä palaminen polttoaineen eri olomuodoissa (Keski-Rahkonen 1986a).

Hehkupalossa happi yhtyy suoraan jähmeän tai nestemäisen aineen pintaan, jolloin samanaikaisesti tarvitaan

- polttoaine
- happi (ilma)
- riittävä lämpötila.

Tässä ehtoja esittävät kuvan 2.4 kolmion sivut. Jos jokin niistä puuttuu, palo ei etene.



Kuva 2.4. Hehkupalon edellytykset.

Liekehtivän ja hehkupalon välimaastoon asettuu huokoisilla, jähmeillä aineilla tavattava **kytevä palo**. Siinä palo etenee vyöhykemäisenä jähmeässä aineessa siten, että kuumen vyöhykkeen edellä kulkee pyrolysoitumisvyöhyke ja varsinainen kuumin kohta on hehkuen palava hiilijäännös aineesta. Kytevän palon etenemisnopeus on pieni ja siksi se saattaa jäädä huomaamatta pitkäksi aikaa. Erityisesti kipinöivien tulitöiden yhteydessä kytevä palo aiheuttaa vaaraa työntekijöiden poistuttua paikalta, sillä työn aikana kipinästä alkanut pieni pesäke saattaa leimahtaa avoliekkiin vasta huomattavan pitkän ajan, jopa tuntien kuluttua. Tuttu esimerkki kytevästä palamisesta on itseksensä palamaan jätetty savuke.

2.1.2 Palamisreaktioiden luonne

Yksinkertaisetkaan aineet eivät **liekkipalossa** reagoi hapen kanssa niinkuin bruttoreaktiokaavasta (1) voisi päätellä. Esimerkiksi metaanin CH_4 palaminen, joka reaktioyhtälö on



tapahtuu todellisuudessa hyvin monen välivaiheen kautta (Drysdale, 1985). Reaktion etenemisnopeudelle ratkaisevan tärkeitä ovat viritetyssä tilassa olevat **radikaalit**, vapaat atomit tai molekyylin osaset kuten H^* , *OH ja *CH_3 . Niiden reaktiivisuus on hyvin paljon suurempi kuin pysyvien molekyylien. Radikaalien tuoton kannalta reaktiot jaetaan neljään ryhmään (vapaan valenssin asema radikaalissa on merkitty tähtösellä *):

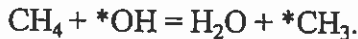
Aloitusreaktio

Neutraalien molekyylien reaktiossa syntyy neutraalien molekyylien lisäksi yksi tai useampi radikaali. Esim.



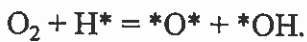
Etenemisreaktio

Molekyylit muuttuvat, mutta radikaalien lukumäärä ei reaktiossa muutu. Esim.



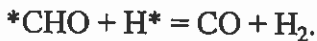
Lisäysreaktio

Radikaalien määrä kasvaa reaktiossa. Esim.



Päättymisreaktio

Radikaalien määrä vähenee reaktiossa. Esim.



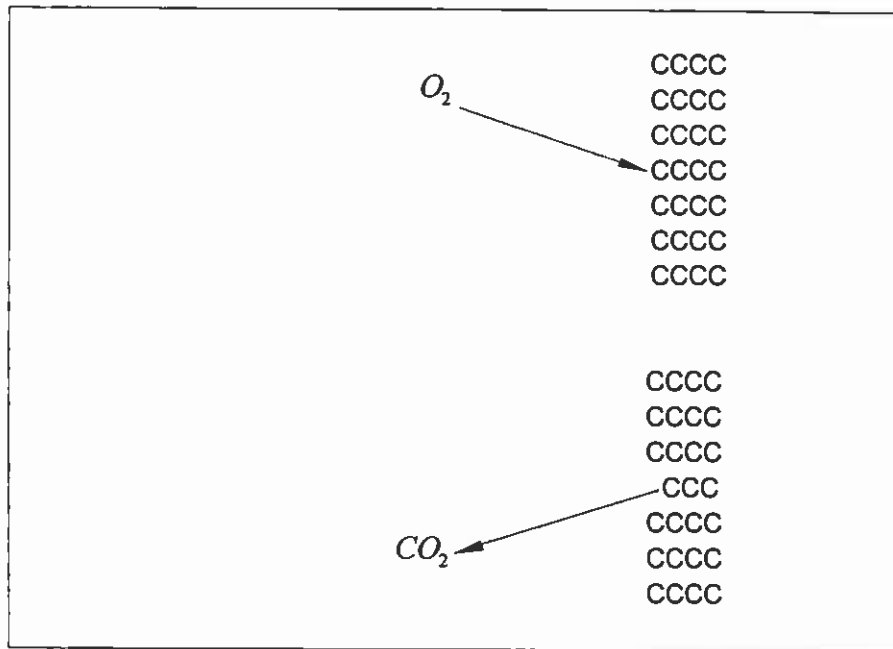
Paloa sytytettäessä olosuhteet pyritään muodostamaan aloitusreaktiolle otolliseksi kohottamalla riittävästi lämpötilaa. Jos lisäysreaktio käynnistyy, radikaalien lukumäärä lisääntyy nopeasti ja palo kasvaa vyörynomaisesti elleivät muut tekijät rajoita sitä. Näin voi syntyä räjähdys.

Etenemisreaktiossa kuluu polttoainetta, mutta reaktionopeus ei muutu radikaalien pitoisuuden muutoksen vuoksi. Päättymisreaktio vähentää radikaalien pitoisuutta ja voi lopulta pysäyttää koko palon.

Hehkupalossa happi reagoi suoraan palavan aineen kanssa sen rajapinnassa eikä radikaaleilla ole edellä esitettyä osaa. Tärkein paloissa esiintyvä hehkuen palava aine on puhdas hiili. Siksi palojen loppuvaiheessa useimmista aineista syntyy hekkuva hiilikasa kun helposti haihtuvat osat ovat jo polttoaineesta hävinneet ja vain hiili on jäänyt jäljelle. Kun lämpötila on alle 500 °C, hiilen hapettumista voidaan kuvata yhtälöllä



Kuvassa 2.5 on esitetty kaavamaisesti, miten tämä heterogeeninen reaktio tapahtuu kiteen pinnalla. Happimolekyyli törmää kiteen pintaan, jossa hiiliatomit istuvat järjestyksessä hilapaikoillaan. Reaktio on hyvin nopea ja syntyvä hiilidioksidimolekyyli CO_2 irtoaa hyvin nopeasti kiteen pinnasta jättäen hilaan tyhjän vakanssikolon C.



Kuva 2.5. Hiilen hapettuminen kiteen pinnalla.

Liekehtivän ja hehkupalon välimuoto on **kytevä palo**. Osa palavasta aineesta pyrolysoituu kuten jähmeän aineen liekehtivässä palossa, mutta kuumiin vyöhykkeeseen syntyy hehkupalosta heterogeenisen hiilen ja hapen reaktiosta kuten yllä on esitetty. Kytöpallon teoriaa ei vielä tunneta kovin hyvin (Drysdale 1985, luku 8). Hyvin karkeasti kytörintaman leviämisenopeus v voidaan esittää kaavalla

$$v \approx \alpha / x \quad (5)$$

missä α on kytevä aineen lämpötilanjohtavuus ($\alpha = k/\rho c$, missä k on lämmönjohtavuus, ρ tiheys ja c ominaislämpökapasiteetti), ja x kuumen alueen paksuus (suuruusluokaltaan 10 mm). Tyypillinen lämpötilanjohtavuuden arvo kytevilla aineilla $\alpha = 0,1 \text{ mm}^2/\text{s}$ sijoitettuna kaavaan (5) ennustaa kytörintaman etenemisnopeudeksi $10 \text{ }\mu\text{m}/\text{s}$, mikä vastaa suurin piirtein havaintoja. Ulkoisen ilmanvirtauksen aiheuttamasta kytevä palon käyttäytymisestä on viime vuosina saatu paljon uutta tietoa sekä luotu toimiva, yhtälöä (5) paljon tarkempi malli palon käyttäytymisen kuvaamiseksi (Torero ja Fernandez-Pello 1995, 1996).

2.1.3 Hapettumisreaktion nopeus

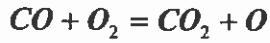
Kemiallinen palamisreaktio ei koskaan ole niin yksinkertainen kuin kaava (1) esittää, mutta teknisiin tarpeisiin lopputulos voidaan usein saattaa tähän muotoon. Reaktiionopeus k on silloin laskettavissa yksivaiheisesta Arrheniuksen yhtälöstä

$$k = A \exp(-E/RT) \quad (6)$$

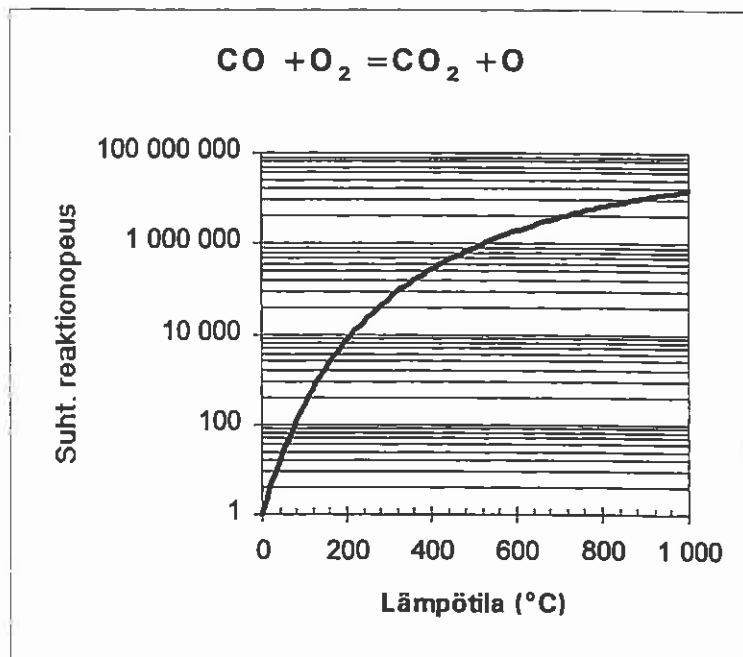
missä A on reaktiosta riippuva kokeellisesti määritettävä vakio (taajuustekijä), E aktivoitumisenergia, R yleinen kaasuvakio ja T absoluuttinen lämpötila (Drysdale

1985). Reaktionopeus k riippuu jyrkästi lämpötilasta. Siten on selitettävissä, että esim. puu huoneenlämpötilassa ei reagoi merkittävästi, mutta kuumennettuna uunissa muutama sataan asteeseen se palaa kiiwaasti.

Kuvassa 2.6 on esimerkkinä esitetty tulipaloissa tavallisen kemiallisen reaktion



hiilimonoksidin CO hapettuminen hiilidioksidiksi CO_2 ja hapeksi O . Tässä reaktiossa taajuustekijä $A = 2,5 \cdot 10^{18} \text{ mol/m}^3$ ja aktivoitumisenergia $E = 47,8 \text{ kJ/mol}$ (Lee ja Chung 1994). Kuvasta 2.6 näkyy, että reaktionopeus kasvaa palamislämpötilaa matalammissa lämpötiloissa noin kaksinkertaiseksi jokaista 10°C :n lämpötilan nousua kohden, ja kaikkiaan huoneenlämpötilasta liekin lämpötilaan ($800 \dots 1000^\circ\text{C}$) noin tekijällä 10^7 . Kullekin reaktiolle taajuustekijä ja aktivoitumisenergia ovat erilaisia, mutta ne ovat suurin piirtein samanlaisia kuin tässä esimerkissä.



Kuva 2.6. Kemiallisen reaktion suhteellisen nopeuden riippuvuus lämpötilasta.

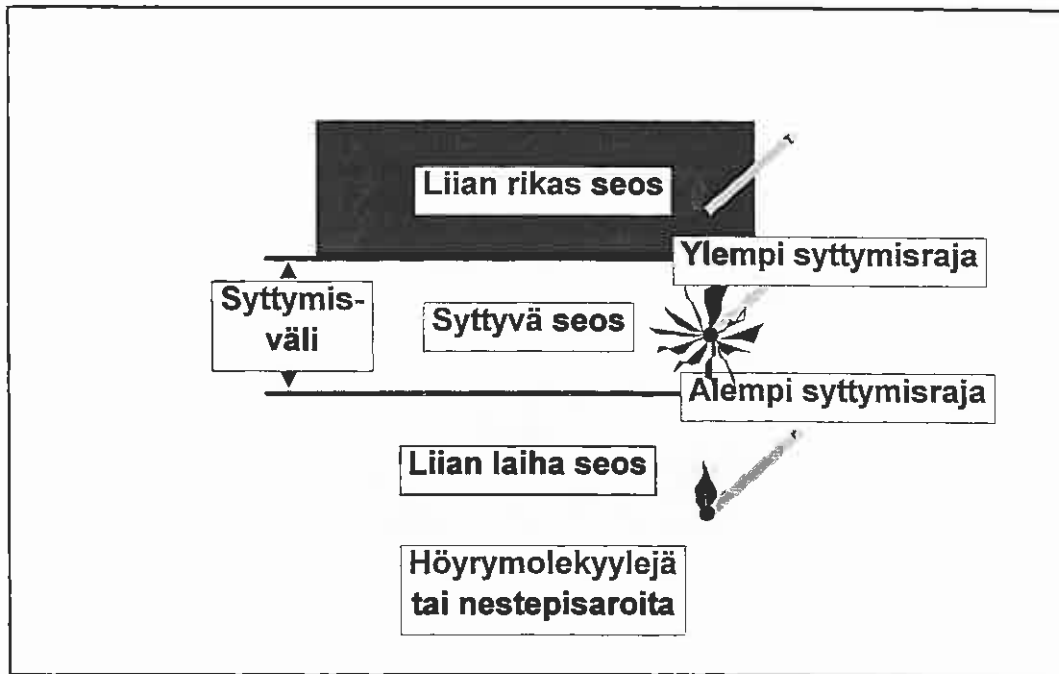
2.2 PALON SYTTYMINEN, KEHITTYMINEN JA LEVIÄMINEN

2.2.1 Palon syttyminen

Jotta palo syttyisi, tarvitsemme polttoaineen johonkin pieneen tilavuuteen riittävän määrän ulkopuolista energiaa. Tällöin lämpötila nousee niin korkeaksi, että hapettumisreaktiot pääsevät yhtälön (6) mukaisena käyntiin. Hapettumisesta vapautuva energia lämmittää ympäröivää polttoainetta ja palaminen jatkuu. Seuraavassa esitellään muutamia syttymisessä esiintyviä käsitteitä.

2.2.1.1 KAASUJEN SYTTYMINEN

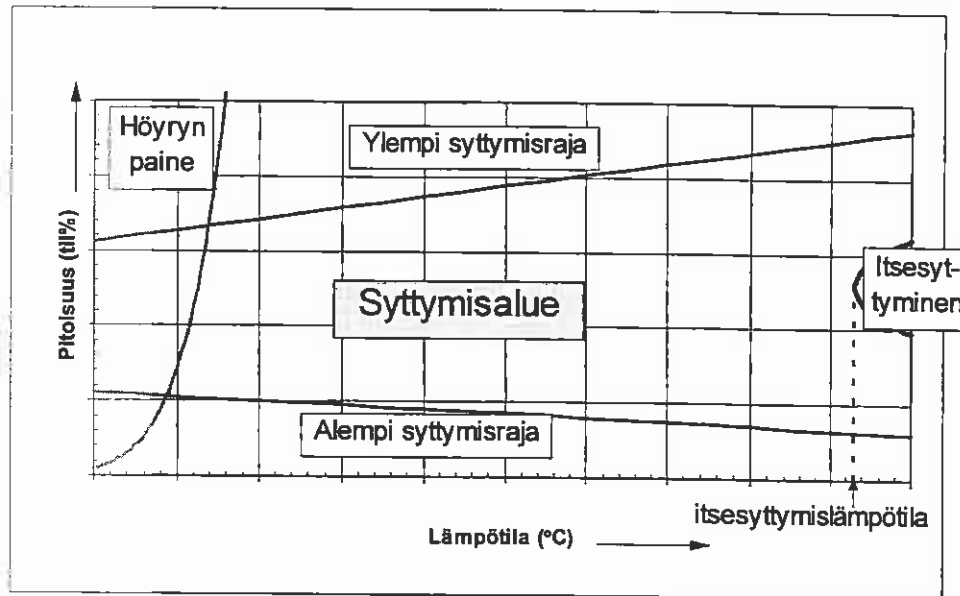
Ajatellaan koetta, missä palavaa kaasua aletaan sekoittaa ilmaan ja yritetään sytyttää. Seos on aluksi niin laihaa, että siitä ei vapaudu kylliksi energiaa eikä se siten ylläpidä palamista. Kun seossuhdetta kasvatetaan, lämmöntuotto lisääntyy kunnes saavutetaan **alempi syttymisraja** (kuva 2.7). Se on kaasu- tai höyryseoksen pienin pitoisuus, joka kykenee ylläpitämään palamista. Kokeellisesti on todettu, että palava kaasuseos syttyy liekistä, kun seoksen energiatiheys on noin 2160 kJ/m^3 hiilivedyillä. Seoksen pitoisuus on silloin noin 48 g/m^3 . Vastaava liekin adiabaattinen lämpötila on $1500 - 1600 \text{ K}$, (Drysdale 1985).



Kuva 2.7. Kaasun ja höyryn syttymisrajat.

Seoksen rikastuessa tullaan lopulta ylemmälle syttymisrajalle. Polttoainetta on niin runsaasti, että seos ei enää syty. Syttymisrajat on mitattu ja taulukoitu tavallisille kaasuille ja palavien nesteiden höyryille, (SFS-käsikirja 39, 1986).

Syttymisrajat laajenevat lämpötilan kohotessa. Alempi syttymisraja alenee ja ylempi kohoaa, kuten kuvassa 2.8 on esitetty. Kun lämpötila kohoaa riittävästi, reaktiot ja lämmönvapautuminen lisääntyvät Arrheniuksen yhtälön (6) mukaisesti niin paljon, että syttymisalueella oleva kaasuseos syttyy ilman ulkopuolista syttymislähdettä. Alinta lämpötilaa, missä näin tapahtuu, kutsutaan **itsesyttymislämpötilaksi**.



Kuva 2.8. Höyryn tai kaasun syttymisrajojen riippuvuus lämpötilasta.

Alempi syttymisraja ei riipu paineesta kovin voimakkaasti, mutta ylempi raja kasvaa merkittävästi paineen noustessa.

Kaasun sytyttämiseen syttymisalueella tarvitaan pieni, mutta äärellinen energiamäärä. Tätä kutsutaan **minimisyttymisenergiaksi**. Sen arvot vaihtelevat suuresti. Pienin tunnettu arvo on vedyllä 0,01 mJ, mutta myös asetyleenillä se on pieni, 0,02 mJ. Muiden hiilivetyjen minimisyttymisenergia on noin 0,25 mJ tai suurempi. Tavallisimpien kaasujen minimisyttymisenergioiden arvoja on taulukoinut esim. Drysdale (1985, s. 80). Vaikka nämä energiat ovat pieniä, syttyminen voidaan estää syttyvän seoksen läsnäollessa pitämällä mahdollisten kipinä- ym. syttymislähteiden energia tätä pienempänä. Näin menetellään esim. räjähdysuojatuissa laitteissa (Ex-luokka).

Minimisyttymisenergialle Ballal ja Lefebre (1981, s. 1737 - 1746) esittivät teorian, joka on myös alan uusimmissa oppikirjoissa (Williams 1985, Kuo 1986, s. 757 - 761). Kipinällä sytyttämiseen halkaisijaltaan kipinävälin d_q suuruinen höyryseospallo on kuumennettava **adiabaattiseen liekin lämpötilaan** T_a . Tähän tarvittava energia on **minimisyttymisenergia** E_{min} . Ballal ja Lefebre (1981 s. 1737 - 1746) laskevat sen kaavalla

$$E_{min} = \frac{\pi}{6} c_p \rho (T_a - T_0) d_q^3 \quad (7)$$

missä c_p on höyryseoksen ominaislämpökapasiteetti, ρ sen tiheys ja T_0 lämmitettävän kaasun alkulämpötila.

2.2.1.2 NESTEIDEN SYTTYMINEN

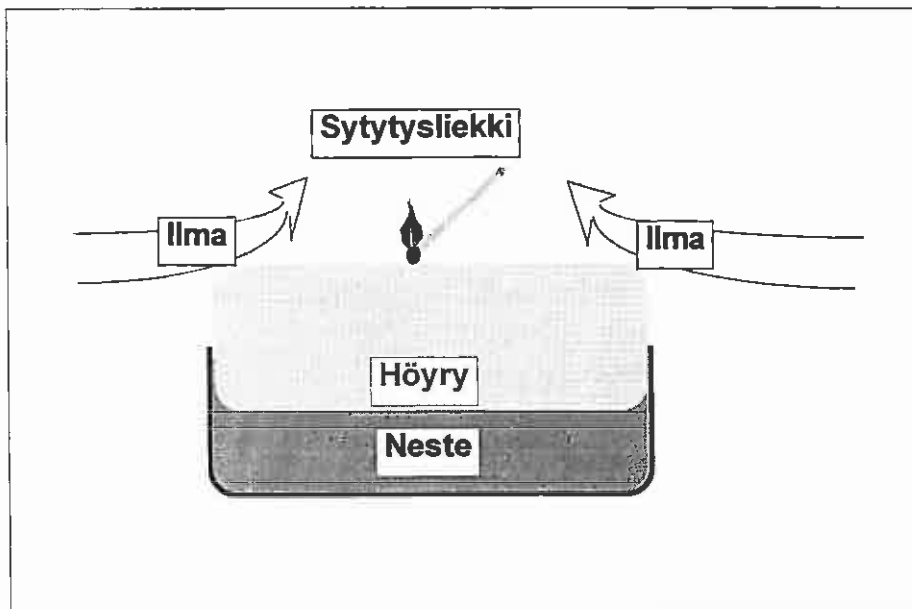
Nesteet sytyvät kaasun tavoin vapaan pinnan yläpuolelle syntyvässä höyryssä. Nesteen höyrynpaine p riippuu absoluuttisesta lämpötilasta T kaavan

$$p = C \exp(-AH/T) \quad (8)$$

mukaisesti. C ja A ovat nesteestä riippuvia vakioita ja H nesteen höyrystymislämpö, (Drysdale, 1985). Lämpötilan kohotessa höyrinpaine kasvaa voimakkaasti. Vapaan nestepinnan yläpuolelle muodostuu höyrykerros. Kun höyrinpaine saavuttaa ulkoisen ilman paineen, neste alkaa kiehua. Sytytettäessä nestettä avoliekillä, pinnan yläpuolella oleva höyry syttyy, kun nesteen lämpötila on **leimahduslämpötilan** t_l yläpuolella. Tässä lämpötilassa höyrin pitoisuus pinnan lähellä saavuttaa alemman syttymisrajan. Lämpötilan ollessa hieman korkeampi eli **syttymislämpötila** t_s , palaminen jatkuu liekin poistamisen jälkeenkin, kuva 2.9. Koska nesteen höyrystyminen ja kiehuminen molemmat riippuvat kaavasta (8), hiilivedyille saadaan yksinkertainen yhteys absoluuttisen leimahduslämpötilan T_l ja kiehumislämpötilan T_k välille, (Keski-Rahkonen 1986b):

$$T_l \approx 0,683 T_k \quad (9)$$

T_l ja T_k lausutaan kelvineinä (K), mutta t_l celsiusasteina ($^{\circ}\text{C}$). Leimahduslämpötilat on taulukoitu esimerkiksi teoksessa SFS-käsikirja 39 (1986).



Kuva 2.9. Nesteen syttyminen liekistä.

Hienojakoinen pöly ja nestesumu palavat nestehöyrin tapaan mikäli niiden pisaroiden koko on riittävän pieni. Useimmat aineet, elleivät ne ole valmiiksi oksideja, muodostavat pölynä ilman kanssa räjähtäviä seoksia. Pölyräjähdysten torjunnasta ja pölyjen vaarallisista pitoisuuksista on ilmestynyt suomenkielinen ohjekirja (SFS-käsikirja 60, 1984). Keski-Rahkonen (1994) on käsitellyt lyhyesti suomenkielellä pölyräjähdysten fysiikkaa.

2.2.1.3 JÄHMEÄN AINEEN PINNAN SYTTYMINEN

Jähmeän aineen sytyttämiseen sen pintaa on lämmitettävä siten, että pinnasta pyrolysoituu riittävästi palavia kaasuja ylläpitämään palamista. Jähmeät aineet palavat liekehtien kaasufaasissa, jolloin materiaalin pitkien molekyyliketjujen on pilkkouduttava lyhyemmiksi, jolloin ne kaasumaisina voivat tunkeutua aineen ulkopuolelle, missä ne voivat palaa joutuessaan kosketuksiin ilman hapen kanssa.

Pinta voidaan sytyttää koskettamalla sitä sytytysliekillä tai tuomalla pinnalle energiaa lämpösäteilynä. Syttymisen tarkkoja ehtoja ei jähmeille aineille tunneta, mutta yllä mainitun pyrolyysikaasupitoisuuden lisäksi voidaan ajatella, että aineen pinnan lämpötila on kohotettava syttymislämpötilan yläpuolelle.

Aineen pintaan osunutta ja sen sisään siirtyvää ja syvemmälle leviävää energiaa kuvaa lämpötunkeutumiskerroin b , joka määritellään

$$b = \sqrt{k\rho c} \approx a\rho \quad (10)$$

missä k on lämmönjohtavuus, ρ tiheys ja c ominaislämpökapasiteetti. Koska rakennusmateriaaleille lämmönjohtavuus k on suurin piirtein verrannollinen tiheyteen ρ ja ominaislämpökapasiteetti on lähes sama eri aineille, lämpötunkeutumiskerroin on karkeasti verrannollinen tiheyteen, jolloin verrannollisuuskertoimen arvoksi saadaan $a \approx 0,70 \text{ Wm s}^{1/2}/\text{kgK}$ (Keski-Rahkonen 1992). Oppikirjan toisen osan kohdassa 1.3 esitetään rakennusmateriaalien lämpöteknisiä ominaisuuksia.

Jähmeän aineen pinnan lämpötila nousee lämmitettäessä viiveellä, jonka pituus riippuu aineen lämpötunkeutumiskertoimesta. Drysdalen (1985) kirjan kuvassa 2.10 on esitetty pinnan lämpötilan suhteellisen nousun riippuvuus lämpötunkeutumiskertoimesta.

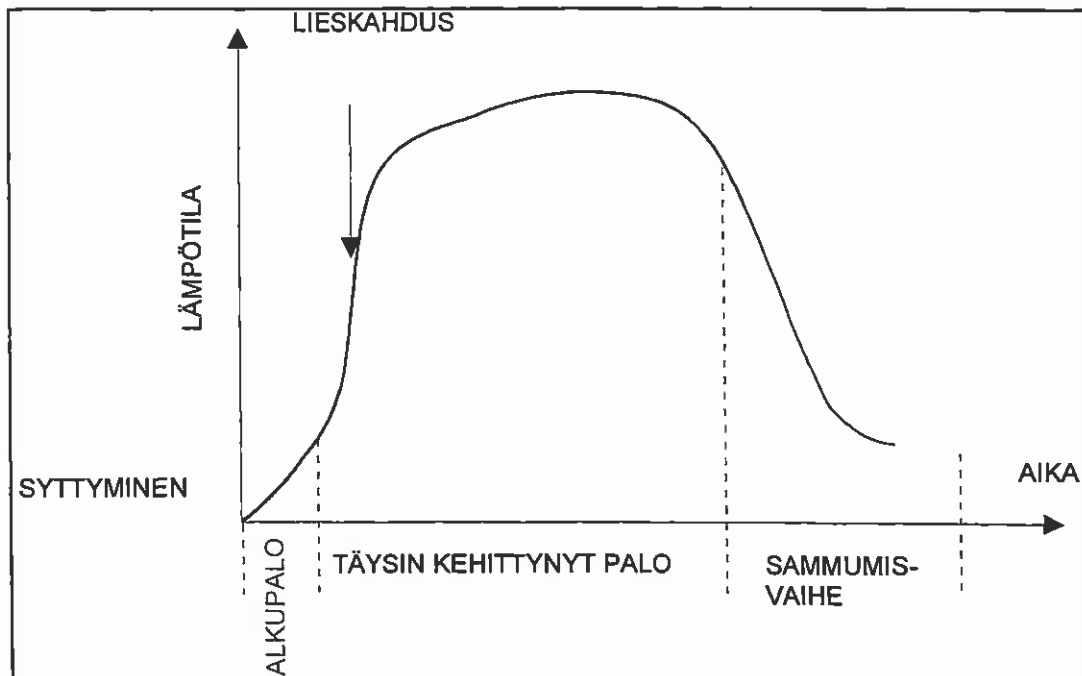
2.2.2 Palon kehittyminen

Vapaassa tilassa sytytetty palo tai räjähdys tuottaa riittävästi energiaa ylläpitääkseen itseään. Se etenee niin kauan, kun polttoainetta tai happea on riittävästi. Vapaassa tilassa palo etenee joko rintamana, kuten metsäpalossa, tai muodostaa kokon palokuormakeskittymän ympärille. Rintamapalon etenemisnopeus saavuttaa nopeasti vakioarvon, jonka suuruus riippuu palokuorman laadusta ja erityisesti tuulen nopeudesta. Keskittyneessä kokossa palavan aineen määrä aikayksikköä kohden riippuu ensisijaisesti saatavan hapen määrästä. Vapaassakin ilmatilassa hapen on tultava virtauksena ympäristöstä. Virtauksen luonne (pyörteeton, pyörteinen) sekä polttoaineen jakauma määräävät, kuinka tehokkaasti happi pääsee yhtymään höyrystyneeseen polttoaineeseen.

Huonetilassa palon ja räjähdyskulku riippuu paitsi polttoaineesta myös suuresti itse tilan rakenteesta. Huone rajoittaa palon hapensaantia ja palossa vapautuvan energian sekä palokaasujen leviämistä ympäristöön. Nämä rajapinnat toimivat siten palolle jonkinlaisina takaisinkytkentäeliminä verrattuna edellisen kappaleen

vapaaseen paloon, jossa vain polttoaine ja ilman virtaukset rajoittavat palon etenemistä.

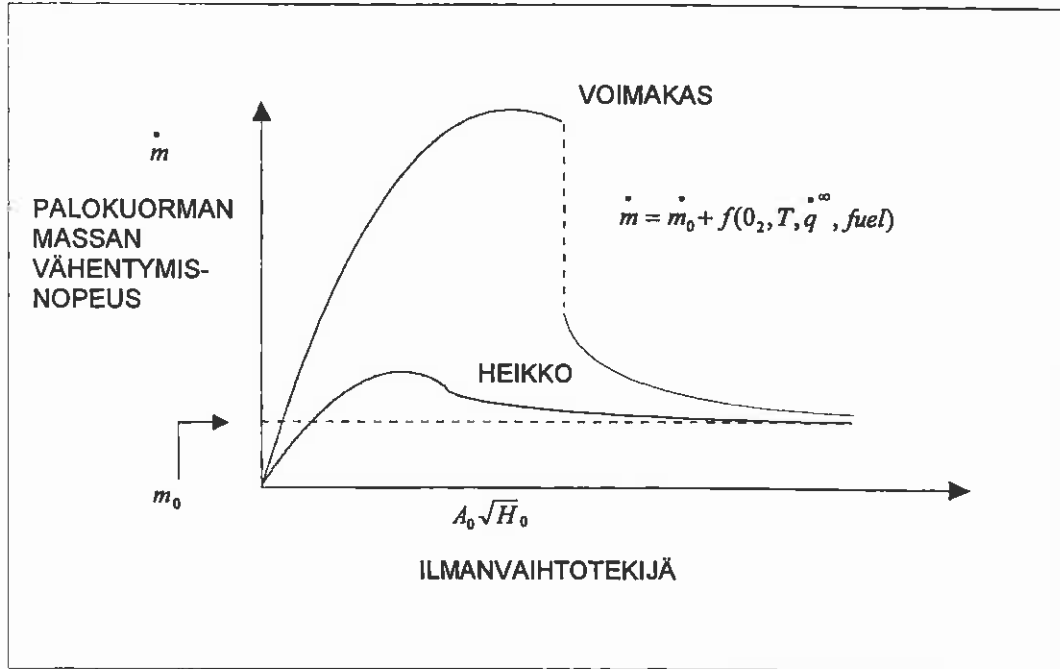
Tässä tarkastellaan pelkästään rajatussa tilassa tapahtuvia paloja, joita kutsumme teknisellä nimellä **huonepaloiksi**. Kuvassa 2.10 on esitetty huonepalon kulku kaavamaisesti (Keski-Rahkonen 1986a). Ajattelemme yhtä huonetta, jota rajoittavassa seinässä on aukkoja (ovet, ikkunat) suoraan ulkoilmaan tai toisiin huoneisiin. Palon syttyä se alkaa kasvaa (**alkupalo**). Liekin suuretessa se lämmittää yhä tehokkaammin, ja mikäli polttoainetta riittää, paloteho ja lämpötila kohoavat yhä nopeammin. Happea on tässä vaiheessa yleensä vielä riittävästi. Liekki ja kuumat palokaasut kuumentavat huonetilan pintoja yhä kuumemmiksi. Lopulta kaikkien palavien aineiden pinta syttyy samanaikaisesti koko huonetilassa. Tätä ilmiötä kutsutaan **lieskahdukseksi**. Koko huonetila on liekkimerenä. Nyt paloteho kohoaa rajusti, samoin lämpötila, kunnes aukoista ei saada enää riittävästi happea kaiken höyrystyneen polttoaineen palamiseen. Osa kaasuista virtaa palamattomana aukoista ja syttyy vasta saatuaan happea ulkoilmasta. Siten aukoista liekit lyövät ulos pitkälle. Huoneessa lämpötilan ja palotehon kasvu pysähtyy. Palo jatkuu **täysin kehittyneenä** likimain vakioteholla kunnes polttoaine loppuu. Tässä **sammumisvaiheessa** paloteho putoaa nopeasti mutta lämpötila laskee hitaammin seinämien luovuttaessa niihin varastoitunutta energiaa.



Kuva 2.10. Huonepalon kulku.

Huonetilan vaikutusta palamisnopeuteen \dot{m} esittää kuva 2.11. Palamisnopeus riippuu yleisesti happipitoisuudesta (O_2), lämpötilasta (T), säteilyvirrantiheydestä \dot{q}^∞ palavan aineen pinnalle sekä polttoaineen (fuel) laadusta. Siinä on palokuorman massan vähentyminen m esitetty ilmanvaihtotekijän $A_0\sqrt{H_0}$ funktiona kaavamaisesti kahdessa tapauksessa, (Quintiere 1984). Tässä A_0 on aukon pinta-ala ja H_0 sen korkeus. Alemman käyrän tapauksessa huonetila on suuri ja sen seinämien vaikutus palamiseen on pieni. Siten palamisnopeus on likipitään vakio ja riittävän

suurella ilmanvirtaustekijällä riippumaton sen suuruudesta. Kun takaisinkytkentä, eli energian säteily kaasusta ja seinämistä takaisin palopesäkkeeseen lisääntyy, palamisnopeuskin kasvaa (ylempi käyrä). Kun ilmanvirtausta lisätään riittävästi, sen jäädyttävä vaikutus pudottaa palamisnopeuden takaisin lähelle vapaan tilan nopeutta. Lieskahduksen voisimme karkeasti ajatellen kuvitella palamisnopeuden siirtymisenä alemmalta käyrältä ylemmälle, kun palotilan energian takaisinkytkentä palopesäkkeeseen voimistuu savupatjan paksuuden kasvaessa nopeasti.



Kuva 2.11. Palamisnopeuden riippuvuus ilmanvaihtotekijästä (Quintiere, 1984).

2.2.3 Palon leviäminen

Palon leviämisessä voidaan erottaa kaksi erilaista tapausta: (a) liekin leviäminen pitkin yhtenäistä palokuormaa ja (b) leviäminen palopesäkkeestä siten, että syntyy erillisiä uusia palopesäkkeitä. Edellistä kohtaa käsitellään lyhyesti palamisen yhteydessä kohdassa 2.3. Tässä selvitetään b-tapauksen mukaisen palon leviämisen periaatteita.

Palo leviää aina aineen- ja lämmönsiirtoprosesseilla. Aineensiirrossa lähes yksinomainen tapa on kuljettuminen. Palo leviää tästä prosessista vain, mikäli aineen lämpösisältö on riittävän suuri. Tarkastelemme näitä tapauksia yhdessä lämmön kuljettumisen kanssa kohdassa 2.2.3.2.

Palossa vapautuvan energian lämpö siirtyy ympäristöön kolmella erilaisella prosessilla: johtumalla, kuljettumalla ja säteilemällä. Kukaan näistä toimii myös palon leviittäjänä.

2.2.3.1 LEVIÄMINEN JOHTUMALLA

Johtumalla lämpö leviää seinän läpi. Jos huoneessa palaa, seinämä voi kuumentua niin paljon, että seinän takana oleva aine syttyy. Johtuminen on syttymissy myös, kun kuuma lämmityslaitteen tai koneen osa koskettaa palavaa ainetta sytyttäen sen. Palomuureilla, hormien lämpöeristeillä ja koneiden suojavaipoilla estetään palon syttymistä näissä tapauksissa. Ehkäisevässä palontorjunnassa rakentamismääräyskokoelmat vaativat rakennusosilta tiettyjä palonkestoaikoja. Niissä vaaditaan mm. tulen vastakkaisen puolen lämpötilannousun pysymistä tietyissä rajoissa palon syttymisen estämiseksi. Lämmönjohtumisesta tulipalotilanteissa on hyvä yleiskatsaus Drysdalen (1985) kirjassa sekä laajempi artikkeli SFPE:n käsikirjassa (Rockett ja Milke 1995).

2.2.3.2 LEVIÄMINEN KULJETTUMALLA

Johtuminen ei ole kovinkaan tehokas palon levittäjä. Yleisimmin palot leviävät kuljettumalla. Noin 70 % palopesäkkeen energiasta kulkeutuu ympäristöön palokaasujen mukana. Ympäristön ilmaa kevyempinä ne nousevat huoneen yläosaan ja virtaavat lopulta aukoista ulkoilmaan tai naapurihuoneisiin. Näiden kaasujen lämpötila voi olla niin korkea, että ne kykenevät sytyttämään kohteita kaukana palopesäkkeestä. Lieskahduksen jälkeen osa höyrystyneestä palokuormasta sekoittuu savupatjaan, mutta ei hapen puutteen takia pala enää tehokkaasti. Kun tällaiset kaasut purkautuvat huoneen ulkopuolelle, jossa happea on enemmän saatavissa, ne roihauttavat liekkeihin ja levittävät paloa kymmenien metrien päähän alkuperäisestä kohteesta. Lämmön kuljettumisesta tulipalotilanteissa on hyvä yleiskatsaus Drysdalen (1985) kirjassa sekä laajempi artikkeli SFPE:n käsikirjassa (Atreya 1995).

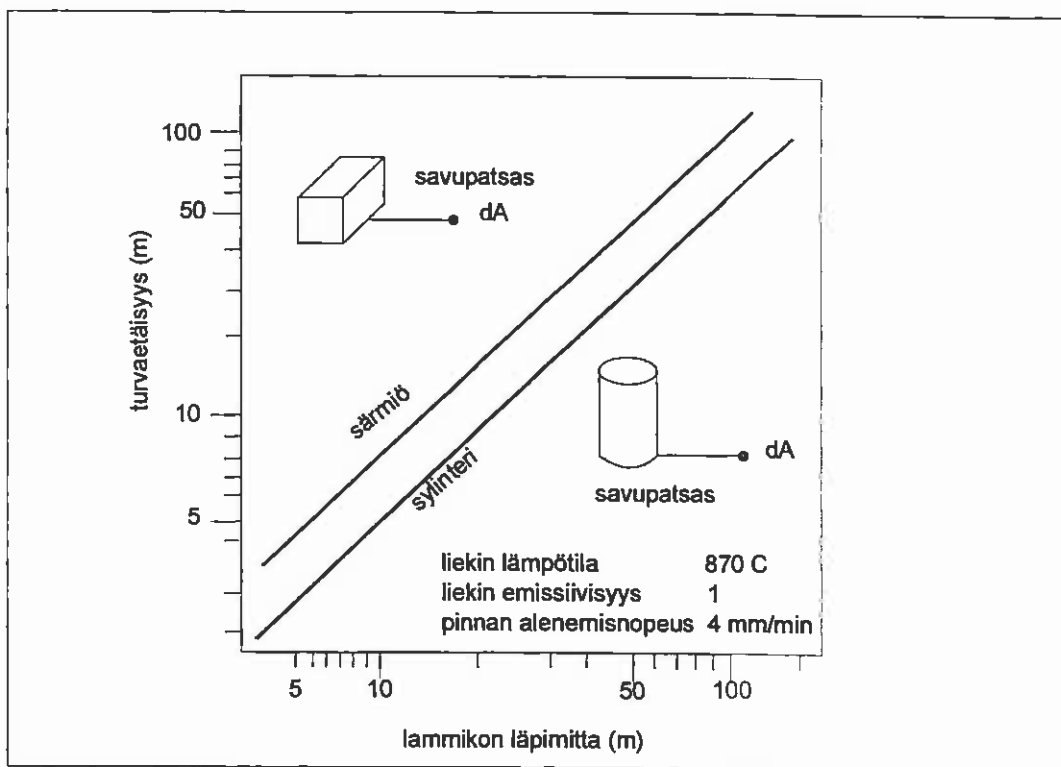
Palavaan huoneeseen syntyy lievä ylipaine. Siten sen seinissä olevista pienistä halkeamista kuumat kaasut tunkeutuvat naapurihuoneisiin, jossa ne voivat sytyttää uusia kohteita. Siksi rakentamismääräyskokoelmat vaativat rakennusosilta myös tiiviyttä.

Oman, edellisestä poikkeavan kuljettumistavan muodostavat kipinät, jotka ympäristöön sinkoutuessaan tai kaasuvirtausten lennättämänä levittävät paloa. Rakennusten kattojen palossa kipinät ovat merkittävä tekijä. Siksi pitkiin kattoihin rakennetaan palokatkoksia, jotka estävät palon etenemisen ja myös kipinöiden sinkoutumisen. Hitsattaessa tai laikalla hiottaessa syntyy kipinöitä tai muitakin kuumia hiukkasia ja kappaleita, jotka kykenevät sytyttämään tavallisimpia palavia aineita pitkienkin aikojen kuluttua. Kipinät ovat erittäin tavallinen syttymissy rakennustyömaiden paloissa.

Kun huonepalo palaa kauan lähes tukahtuneena, palokuormasta höyrystyneet kaasut voivat kuljettua kauas palopesäkkeestä ja muodostaa niin rikkaan kaasuseoksen, että se ei enää syty. Kun palotilan aukkoja avataan (palomiehet), ilmaa virtaa huoneeseen ja kaasut laimenevat saaden happea. Jos ilman ja kaasuseoksen sekoittuminen on voimakasta, se voi räjähtää humahtaen (**palokaasuräjähdy**s).

2.2.3.3 LEVIÄMINEN SÄTEILEMÄLLÄ

Nestepaloissa sekä rakennusten paloissa muodostuu suurikokoinen, kuuma liekki. Se säteilee energiaa ympäristöön Stefanin-Boltzmannin lain mukaisesti verrannollisena absoluuttisen lämpötilan neljänteen potenssiin. Kuvassa 2.12 on käyrästä, jolla arvioidaan tarvittavia turvaetäisyyksiä erikokoisille palopatsaille lammikkopalossa nestelammikon läpimitan funktiona. Syttymiskriteeriksi oletetaan lämpövirta 25 kW/m^2 . Näitä turvaetäisyyksiä noudatetaan kaavoituksessa rakennusten sijoittelussa sekä erikoisesti palavien nesteiden varastosäiliöalueiden suunnittelussa. Lämpösäteilystä tulipalotilanteissa on hyvä yleiskatsaus Drysdalen (1985) kirjassa sekä laajempi artikkeli SFPE:n käsikirjassa (Tien ym. 1995).



Kuva 2.12. Suojaetäisyyden riippuvuus palopesäkkeen läpimitasta.

2.3 KAASUJEN JA NESTEIDEN PALAMINEN

2.3.1 Palamisnopeus ja liekkirintaman etenemisnopeus

Liekin etenemismekanismeista pitkin polttoainetta saamme kuvan tarkastelemalla kaasupolttimeen vakavoitua liekkiä, kuva 2.13a. Polttimeen syötetään vakionopeudella polttoainetta ja ilmaa, jotka sekoittuvat hyvin suutinta edeltävässä kammiossa. Kun virtaus on laminaarista, polttimen liekki vakavoituu nopeasti sytyttämisen jälkeen lähes tasomaiseksi lähelle suuttimen pintaa. Kuvassa 2.13b vaak akselina on paikkakoordinaatti, joka on kohtisuorassa tätä liekin tasoa

vastaan. Pystyakselilla on kaavamaisesti esitetty lämpötila sekä reagoivien komponenttien pitoisuus. Esisekoitettu polttoaine-ilmaseos virtaa kuvaan sisään vakionopeudella S vasemmalta ja palotuoitteet poistuvat oikealta.

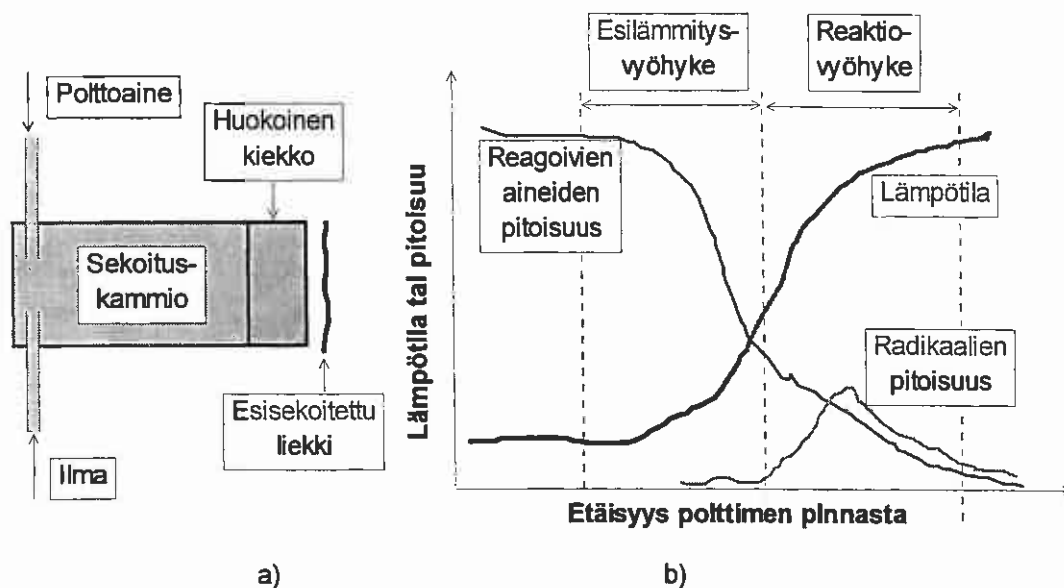
Palamisessa on erotettavissa kolme vyöhykettä: (a) **esilämmitys-**, (b) **reaktio-** ja (c) **jäähtymisvyöhyke**. Yksinkertaistaen palaminen voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen, joista aina yksi tapahtuu kussakin näistä vyöhykkeistä.

Esilämmityksessä alkulämpötilassa T_0 oleva polttoaineen ja ilman seos kuumenee jo palavasta liekistä niin paljon, että hapettumisreaktiot käynnistyvät Arrheniuksen yhtälön (6) mukaisesti.

Pienessä liekissä pyörteettömässä virtauksessa lämpö siirtyy liekistä johtumalla. Säteilyn osuus on siihen verrattuna pieni. Kuvassa 2.13b liikuttaessa esilämmitysvyöhykkeen läpi vasemmalta oikealle lämpötila kohoaa, mutta reagoivien aineiden pitoisuus ei muutu merkittävästi ennen vyöhykkeen oikeanpuoleista rajapintaa.

Reaktiovyöhykkeessä lämpötila on riittävän korkea hapettumiselle, joka etenee nopeasti siirryttäessä vyöhykkeen läpi. Reagoivien aineiden pitoisuus putoaa lähes nolnaan ja lämpötila kohoaa maksimiarvoonsa T_b . Reaktion välituotteilla, kohdan 2.1.2 radikaaleilla on pitoisuusmaksimi vyöhykkeen keskivaiheilla. Palotuoitteiden käyrää ei ole kuvaan 2.13b piirretty, mutta se kulkee vastakkaiseen suuntaan kuin reagoivien aineiden pitoisuuskäyrä. Se alkaa nollasta vyöhykkeen vasemmasta reunasta ja kohoaa maksimiin sen oikeaan reunaan mennessä.

Jäähtymisvyöhykkeessä palotuoitteet menettävät lämpöenergiaa jäähtyen lopulta ympäristön lämpötilaan, mutta ne eivät enää sanottavasti reagoi keskenään.



Kuva 2.13. Diffuusioliekin rakenne (a) kaasupolttimessa ja (b) leikkauksessa kohtisuoraan liekkirintamaa vastaan (Drysdale, 1985).

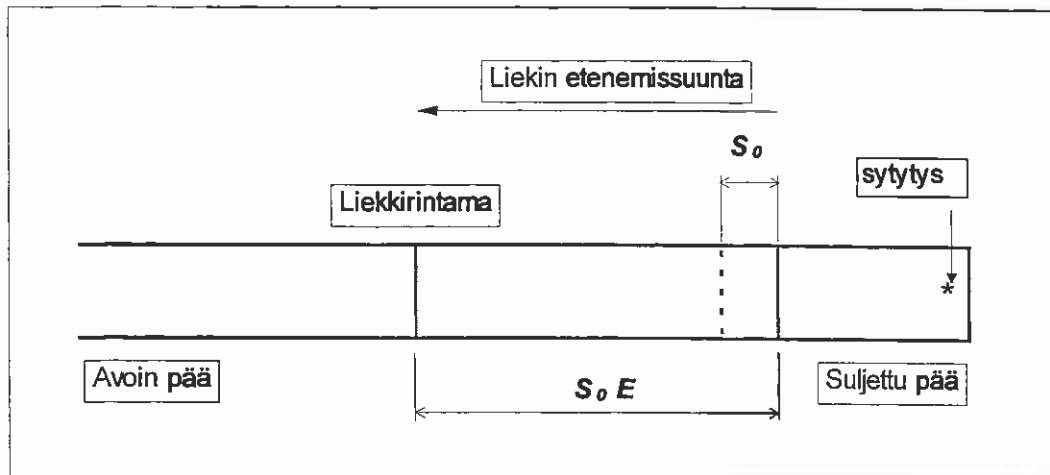
Pyörteettömässä virtauksessa polttimen esilämmitysvyöhykkeen paksuus on millimetrin suuruusluokkaa. Reaktiovyöhyke on sitäkin ohuempi. Ihanteellisesti reaktion voidaan olettaa tapahtuvan hetkellisesti vyöhykkeessä, jonka paksuus lähenee nollaa. Tällöin puhutaan **reaktiotasosta**. Jäähdytysvyöhykkeen paksuus on epämääräinen, mutta näitä paljon suurempi.

Tässä mallissa kaasu virtaa polttimesta nopeudella S_0 . Reaktiotaso etenee siten palamattomaan polttoaineeseen virtaussuuntaa vastaan myös nopeudella S_0 . Siksi kutsumme nopeutta S_0 myös **palamisnopeudeksi**. Jos olettaisimme kaasupolttolainepölyksen pysyvän paikoillaan mutta reaktiovyöhykkeen etenevän siinä, millä nopeudella se kulkisi? Mittaukset ja laskelmat osoittavat sen etenevän myös nopeudella S_0 . Tämä palamisnopeus S_0 on kaasun aineominaisuus, kun lämpöhäviöitä ei ole. Suurin tunnettu nopeus $S_0 = 3,2$ m/s on vedyllä. Asetyleenillä se on 1,7 m/s ja muilla hiilivedyillä 0,3 ... 0,5 m/s.

Palamisnopeudesta S_0 on erotettava **liekkirintaman etenemisnopeus** S_f , joiden välinen yhteys on

$$S_f = S_0 (T_b/T_0)(N_b/N_0) = S_0 E \quad (11)$$

missä N_b on palokaasujen sekä N_0 polttoaineen ja ilman moolimäärä. Kuvassa 2.14 on selvitetty yhtälön (11) sisältöä. Oletetaan esisekoitetun kaasun olevan putkessa, jonka toinen pää on suljettu mutta toinen avoin. Kaasu sytytetään suljetusta päästä. Palaminen etenee pitkin putkea ensin nopeudella S_0 . Palaessa kaasujen moolimäärä muuttuu reaktanttien N_0 :sta palokaasujen N_b :hen. Siten niiden tarvitsema tilavuus muuttuu moolimäärien suhteessa. Lisäksi kaasut palossa lämpenevät



Kuva 2.14. Liekkirintaman etenemisnopeuden S_f ja palamisnopeuden S_0 välinen yhteys.

ja laajenevat. Tilavuus lisääntyy tekijällä T_b / T_0 . Jo palaneet kaasut työntävät suljetusta päästä palaneiden ja palamattomien kaasujen rajapintaa, reaktiovyöhykettä, edellään. Siksi liekkirintaman todellinen etenemisnopeus S_f putken pohjan suhteen on palamisnopeutta S_0 suurempi.

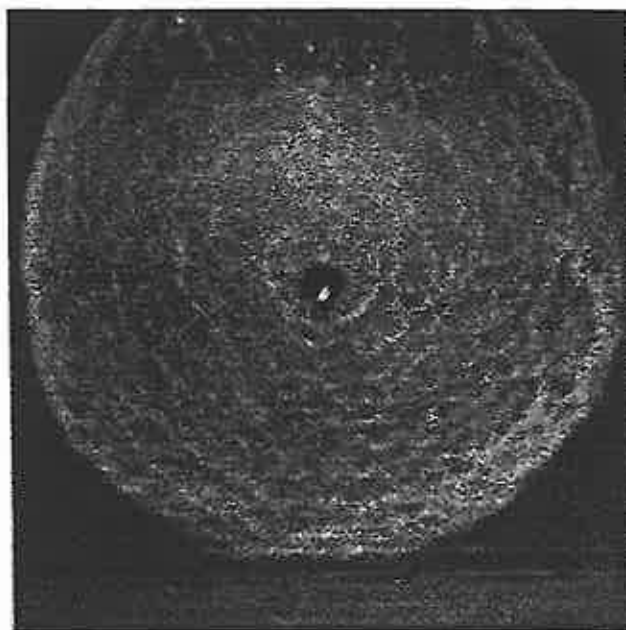
Palamisessa kaasun moolimäärä voi joko kasvaa tai vähentyä riippuen polttoaineen koostumuksen mukaan. Jos happi saadaan ilmasta, jossa on mukana happeen verrattuna nelinkertainen määrä tehottomana pysyvää typpeä, reaktanttien ja reaktiotuotteiden kokonaismoolimäärien ero on vähäinen. Sitä vastoin absoluuttinen lämpötila T kohoaa tekijällä 2 ... 7. Siksi liekkirintaman etenemisnopeus on aina huomattavasti palamisnopeutta suurempi.

2.3.2 Liekin leviäminen kaasussa

Kaasujen palolle on ominaista nesteiden ja jähmeiden aineiden paloon verrattuna liekin nopea leviäminen. Liekkirintaman palamisnopeudet ovat suuria nesteiden ja jähmeiden aineiden vastaaviin nopeuksiin verrattuina. Ellei erityisen nopeita toimenpiteitä automaattisilla sammuttimilla järjestetä, palo etenee, kunnes polttoaine loppuu.

Jos kaasu on syttymishetkellä sekoittunut ilmaan, palon liekkirintama etenee suuressa tilassa edellisen kohdan mukaisesti vakionopeudella S_f kaikkiin suuntiin. Koska syttymisalue on yleensä pieni, liekkirintama kasvaa pian syttymisen jälkeen pallopintana kunnes se kohtaa esteitä (kuva 2.15).

Kun reaktiovyöhykkeessä virtaus muuttuu pyörteettömästä pyörteiseksi, reaktiokerros ei ole enää ohut sileä pinta. Se rypistyy voimakkaasti, joten rajapinnan pinta-ala lisääntyy. Sekoittuminen kasvaa ja palamisnopeus suurenee moninkertaiseksi pyörteettömään S_0 :aan verrattuna.



Kuva 2.15. Pallomaisen palorintaman muodostuminen vapaassa kaasupilvessä (Harris 1983).

Jos kaasu ja hapetin eivät ole sekoittuneet syttymishetkellä toisiinsa, palamisnopeutta säätelee sekoitusmekanismi. Tällainen tapaus on esimerkiksi raskaan kaasun vuotaminen huonetilan alaosaan. Kun kaasu syttyy, palaminen tapahtuu rajapinnan lähetyvillä. Jos kaasua sekoitetaan voimakkaasti esim. avaamalla ovia tai ilmanvaihtokanavia, hapensaanti lisääntyy ja palamisnopeus kasvaa sen mukaisesti.

Vastaava käytännössä esiintyvä tilanne havaitaan tiiviiseen tilaan tukahtuneessa palossa. Kuumia palavia kaasuja on höyrystynyt tilan yläosaan, mutta hapen vähetessä ne eivät enää pala. Kun tilaan avataan aukko, josta tulee uutta ilmaa, hapetta saadaan lisää ja virtaukset sekoittavat kaasut. Jos sekoittuminen on kyllin voimakasta, seurauksena saattaa olla palokaasuräjähdyks.

2.3.3 Liekin leviäminen nesteen pinnassa

Kun nestelammikko sytytetään pieneltä alueelta, liekin leviäminen muualle nesteen pinnalle riippuu huomattavasti nesteen lämpötilasta. Jos nesteen lämpötila on korkeampi kuin sen leimahduslämpötila, pinnan yläpuolella on ohut syttyvä höyry-ilma-seos. Jos se sytytetään, liekki leviää kaasupalon nopeudella ja seurauksetkin ovat samantapaiset kuin kaasupalossa.

Mikäli neste on lisäksi syttymislämpötilaa korkeammassa lämpötilassa, se jatkaa sytyttämisen jälkeen palamista, joka pian tasoittuu vakionopeuteen.

Kun neste on leimahduslämpötilaa alemmassa lämpötilassa, se voidaan sytyttää vain paikallisesti. Liekki leviää syttymislähteen ulkopuolelle, jos se kykenee lämmittämään lähialueen pintakerrosta leimahduslämpötilaa korkeammalle. Leviämisnopeuteen vaikuttavat ennen kaikkea lämmönsiirto liekeistä nesteen pintaan, mutta myös lämpenemisen aiheuttamat virtaukset nesteessä.

Liekki leviää nopeimmin myötätuuleen. Virtaukset painavat liekkejä lähemmäksi pintaa, jolloin sekä kuljettuminen että säteily lisääntyvät. Vastatuuleen liekki leviää hitaammin, sillä nyt ainoana lämmönsiirtomekanismina rintaman lähellä on kuljettuminen.

Lämmitessä nesteen pintajännitys pienenee. Tämä aiheuttaa pintakerroksessa virtauksen palopesäkkeestä poispäin, jolloin korvaava neste tulee alempaa, jossa se on myös kylmempää. Siten pintajännityksen muutos pyrkii estämään liekin leviämistä. Koska nesteiden virtausten laskeminen on hankalaa, ei ole vielä olemassa yksinkertaista teoriaa, joka kuvaisi liekin leviämistä nesteiden pinnalla. Etenemisnopeudet ovat kuitenkin vain luokkaa 10 mm/s.

2.3.4 Nestepinnan alenemisnopeus

Kun nestelammikon koko pinta on syttynyt, se alkaa pian palaa vakioteholla. Pinnasta höyrystyy uutta polttoainetta niin paljon kuin liekeistä tuleva säteily kykenee höyrystämään. Nestepinta alenee siten vakionopeudella v , joka on laskettavissa laadutetulla kaavalla

$$v = 1,3 \mu\text{m} / \text{s} (H_a / H) \quad (12)$$

missä H_a on nesteen alempi palamislämpö ja H sen höyrystyslämpö. Tyypillinen pinnan alenemisnopeus hiilivedyillä on $70 \mu\text{m} / \text{s}$.

Kaavasta (12) saadaan johdetuksi palotehon P kaava pinnan alenemisnopeuden v avulla

$$P = v\rho H_a \quad (13)$$

missä ρ on nesteen tiheys. Tyypilliselle hiilivedylle paloteho P pinta-alayksikköä kohden on :

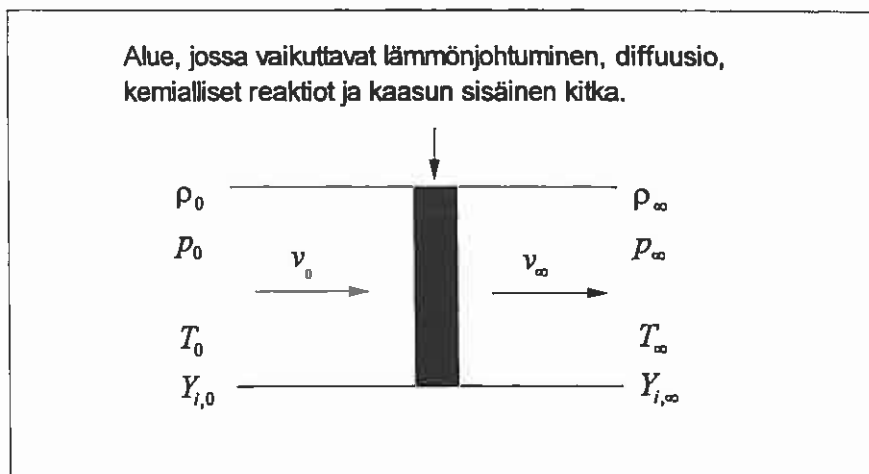
$$P = 70 \mu\text{m/s} \cdot 600 \text{ kg/m}^3 \cdot 40 \text{ MJ/kg} \approx 1,7 \text{ MW/m}^2$$

Paloteho riippuu myös lammikon koosta, mutta säteen ollessa suurempi kuin 1 m, paloteho pysyy vakiona.

2.4 KAASURÄJÄHDYKSET

2.4.1 Yleinen palorintaman teoria

Kaasuräjähdyksen kuvaaminen on monimutkainen teoreettinen ongelma. Yksinkertaisimmillaan voimme kuitenkin lähteä täysin matemaattisista yhtälöistä, joita kutsutaan säilymislaeiksi. Oletamme kuvan 2.16 mukaisesti, että räjähdys etenee vapaassa tilassa tai laajassa, pitkässä putkessa vakionopeudella siten, että suureet eivät enää muutu ajallisesti. Tarkastelemme tilan muuttujia ennen palorintamaa ja jonkin matkaa sen jälkeen.



Kuva 2.16. Räjähdysaallon eteneminen vapaassa tilassa (Williams, 1985).

Kaasun tiheys ρ , paine p , virtausnopeus v , lämpötila T ja reagoivien komponenttien pitoisuudet Y_i ovat tunnetut. Ennen palorintamaa näitä suureita merkitään

alaindeksillä 0. Reaktion jälkeen kaukana rintamasta suureet saavat taas ajasta riippumattoman arvon, jota merkitään alaindeksillä ∞ .

Massan säilymislaki ilmaistaan jatkuvuusyhtälönä

$$\rho v = m = \text{vakio} \quad (14)$$

Liikemäärän säilymislaki saa muodon

$$\rho v^2 + p = \text{vakio} \quad (15)$$

Energian säilymislaki kirjoitetaan entalpian eli lämpösisällön h avulla

$$h + v^2/2 = \text{vakio} \quad (16)$$

Hiukkasten säilymislaki toteaa, että kemian reaktioissa atomien lukumäärä ei muutu.

Lisäksi tarvitaan tilanyhtälöt kaasuille, jotka kuvaavat miten kaasun paine riippuu tilavuudesta ja lämpötilasta sekä miten kaasun sisäenergia riippuu lämpötilasta.

Näistä ehdoista voidaan hapettumiselle kirjoittaa yhtälöryhmä, joka määrittelee ongelman täysin matemaattisesti. Se voidaan myös ratkaista. Soveltamalla näitä ehtoja kuvan 2.16 tapaukseen saamme sen alku- ja lopputilojen välille yhteydet, joiden perusteella räjähdys luokitellaan.

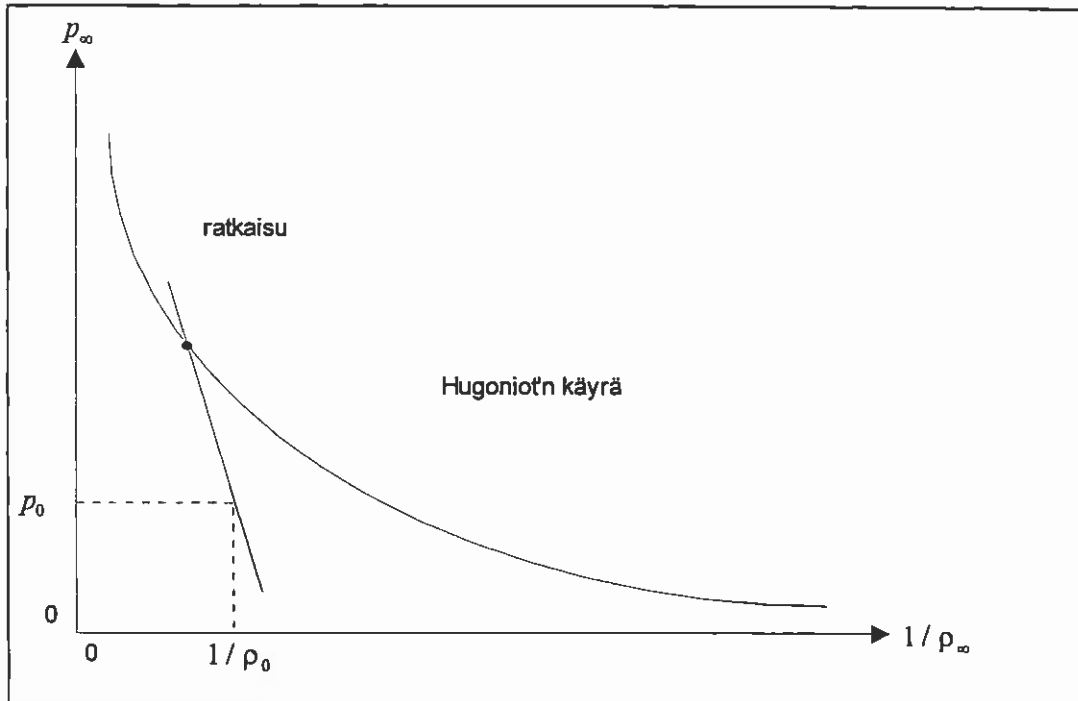
Liikemäärän säilymislaista (15) seuraa

$$p_\infty - p_0 = -m^2(1/\rho_\infty - 1/\rho_0) \quad (17)$$

Energian säilymislaista (16) saadaan vastaavasti yhtälö

$$p_\infty - p_0 = 2(h_\infty - h_0)/(1/\rho_\infty + 1/\rho_0) \quad (18)$$

jota kutsutaan Hugoniot'n yhtälöksi. Esitetään nämä käyrät tasossa, jossa x-akselina on $1/\rho_\infty$ ja y-akselina p_∞ , kuva 2.17. Edellisen kuvaaja on suora (Rayleighin suora)



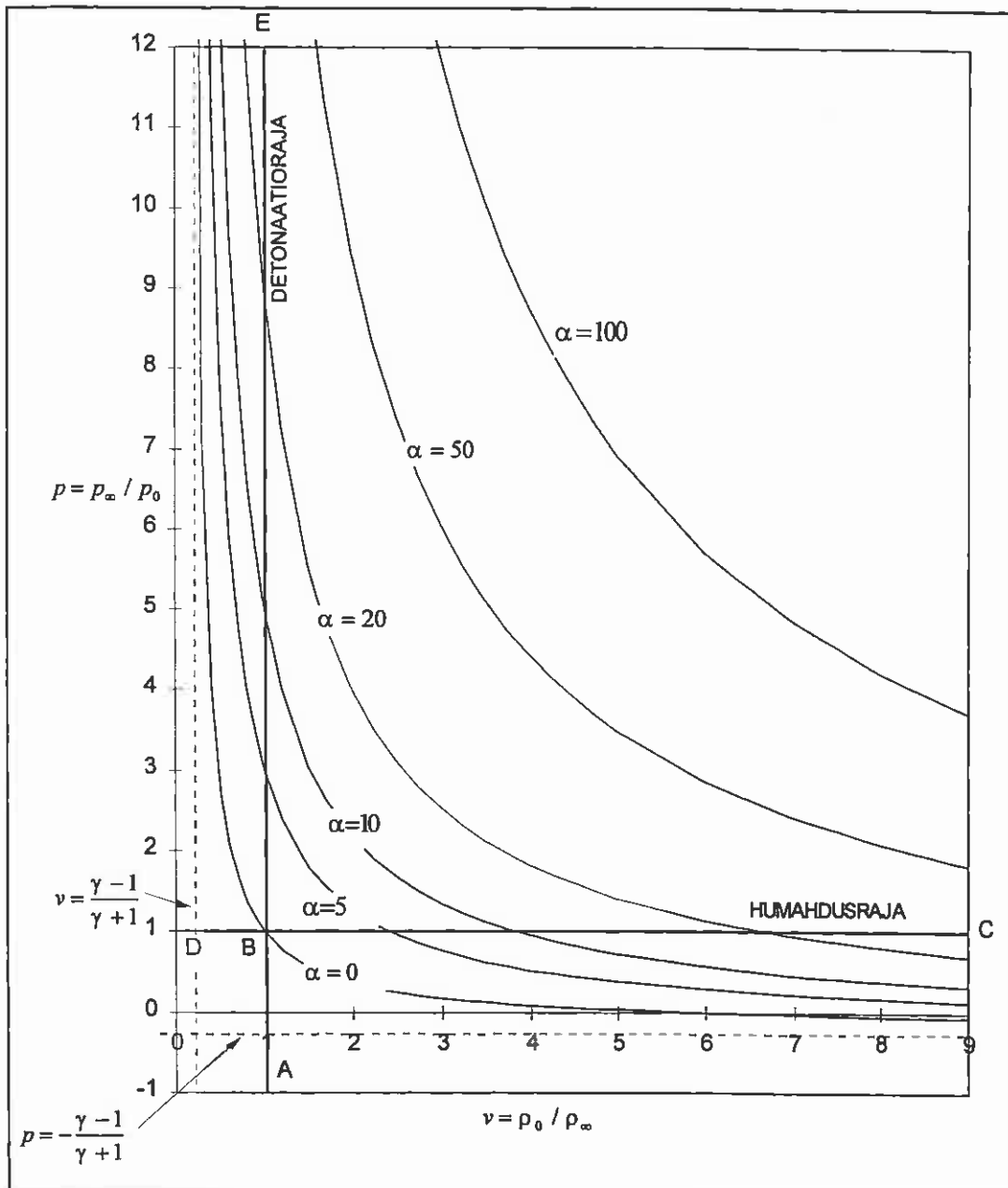
Kuva 2.17. Lopputilan virtaussuureiden määrittäminen Rayleighin suoran ja Hugoniot'n käyrän leikkauspisteestä (Williams, 1985).

ja se kulkee aina pisteen $(1/\rho_0, p_0)$ kautta. Lisäksi sen kulmakerroin on aina negatiivinen. Jälkimmäisen kuvaaja on hyperbeli. Nämä yhtälöt toteutuvat samanaikaisesti kohdissa, missä suora leikkaa hyperbelin.

2.4.2 Räjähdyksen luokittelu

Kuvassa 2.18 nämä yhtälöt on ratkaistu kaasulle, missä palotuotteiden ominaislämpöjen suhde $\gamma = c_p / c_v = 1,4$. Vaaka-akselina on suhteellinen tiheys $\nu = \rho_0 / \rho_\infty$ ja pystyakselina suhteellinen paine $p = p_\infty / p_0$. Hugoniot'n hyperbelit ovat tasa-arvokäyriä, joiden parametrina α on reaktiossa vapautuvaan energiaan verrannollinen suure.

Rayleighin suora, joka kulkee pisteen $(1,1)$ kautta, jakaa tämän tason kahteen alueeseen. Suoran kulmakertoimen $-m$ on oltava ≤ 0 . Ensimmäistä rajaa $-m = 0$ esittää vaakasuora viiva $p = 1$. Sallitut systeemin lopputilat ovat pisteissä, missä Rayleighin suora ja Hugoniot'n hyperbeli leikkaavat. Jokainen suora leikkaa hyperbelin kahdessa pisteessä viivan $p = 1$ alapuolella olevassa varjostamattomassa alueessa. Sitä kutsutaan **hamaudusalueeksi**.



Kuva 2.18. Hugoniot'n diagrammi ($\gamma = 1,4$). Alue ABC alhaalla oikealla on humahdusalue ja DBE ylhäällä vasemmalla detonaatioalue (Williams, 1985).

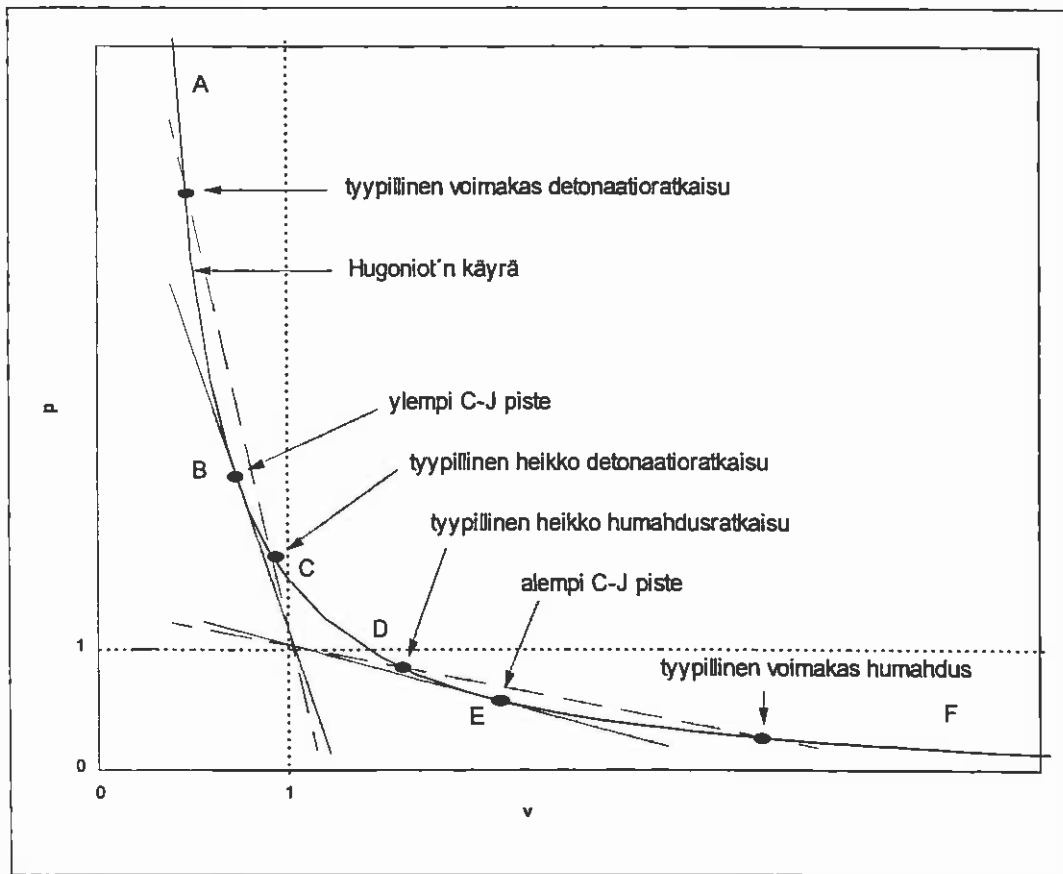
Toista rajaa $-m = -\infty$ esittää pystysuora viiva $v = 1$. Sen vasemmalla puolella olevassa varjostamattomassa alueessa Rayleighin suora leikkaa hyperbelin kahdessa pisteessä. Aluetta kutsutaan **detonaatioalueeksi**.

Näiden nimitysten alkuperä selviää tarkastelemalla yhtälöitä perusteellisemmin. Tässä sitä ei tehdä, mutta annetaan lopputulokset. Kuvassa 2.19 on hyperbelin ja suoran leikkauspisteet ja niiden erikoisnimet.

Rayleighin suora leikkaa tangenttina hyperbelin kahdessa pisteessä: detonaatiohaarassa B:ssä (ylempi Chapmanin-Jouget'n piste) ja humahdushaarassa E:ssä (alempi Chapmanin-Jouget'n piste).

Räjähdysaaltoja, jotka vastaavat näitä pisteitä, kutsutaan **Chapmanin-Jouget'n aalloiksi**.

Rayleighin suora voi leikata hyperbelin myös kahdessa pisteessä. Detonaatiohaarassa ylemmää leikkauspistettä kutsutaan **voimakkaaksi detonaatoratkaisuksi** ja alemmää **heikoksi detonaatoratkaisuksi**. Vastaavasti humahdushaarassa oikeanpuoleinen leikkauspiste on **voimakas humahdusratkaisu** ja vasemmanpuoleinen **heikko humahdusratkaisu**.



Kuva 2.19. Hugoniot'n käyrän erikoispisteiden nimitykset (Williams, 1985).

Käytännössä kokeellisesti havaitaan lähes ainoastaan detonaatioina ylempi Chapmanin-Jouget'n aalto ja humahduksena heikko humahdus. Ylemmälle Chapmanin-Jouget'n aallolle on tyypillistä ylääänin nopeudella tapahtuva virtaus ennen palorintamaa ja täsmälleen äänen nopeudella etenevä virtaus rintaman jälkeen. Siten kaasun virtaus hidastuu, mutta tiheys kasvaa ja paine kohoaa huomattavasti. Koska yläääniseen virtaukseen liittyy iskuaallon syntyminen, joka kokeissa kuullaan kovana pamahduksena, räjähdystä kutsutaan detonaatioksi.

Heikot humahdukset tapahtuvat kuvan 2.19 kaaren osuudella DE. Niille on tyypillistä virtausnopeuden kasvu ja tiheyden pieneneminen kuljettaessa läpi

palorintaman. Virtausnopeudet ovat kuitenkin aina äänen nopeutta pienemmät eikä iskuaalto synny. Paine pienenee hieman, mutta muutos on suhteellisesti pienehkö. Tästä syystä räjähdys ei ole kovin äänekäs ja sitä kutsutaan humahdukseksi eli **deflagraatioksi**.

Näiden teoreettisten pohdintojen taustaa vasten on ymmärrettävissä räjähdysten luokittelu, jota käytetään useissa säädöstekeissä. Palojen ja räjähdysten välillä ei ole mitään fysikaalista eroa, mutta ne erotetaan toisistaan, koska käytännön seurauksilla on merkittävä ero. **Räjähdys** määritellään suuren energiamäärän äkilliseksi purkaukseksi. **Palossa** liekin etenemisnopeus on alle 10 m/s.

Humahdus on räjähdysmäinen palo, jossa polttoaine hajoaa, mutta iskuaalto ei muodostu. Liekin etenemisnopeus on pienempi kuin äänen nopeus kyseisessä aineessa eli tavallisesti alueella 10 ... 1000 m/s. Paineennousu ei ole raju.

Detonaatio on erittäin nopea kemiallinen reaktio, missä (liekin) etenemisnopeus on suurempi kuin äänen nopeus kyseisessä aineessa, tavallisesti yli 1000 m/s. Reaktorintamaan kytkeytyy iskuaalto, joka etenee räjähdysaineelle ja räjähdystilalle ominaisella nopeudella. Paineen nousu on useimmiten raju.

Palo voi muuttua humahdukseksi tai detonaatioksi, jos olosuhteet ovat siihen suotuisat. Kehitykseen vaikuttavia tekijöitä ovat polttoaineen laatu, sytytyksen voimakkuus ja varsinkin räjähdystilan rakenne, josta riippuu miten syntyvä ylipaine pääsee purkautumaan.

3. PALOPAIKKA, SEN DOKUMENTOINTI JA NÄYTTEENOTTO

3.1 TYÖTURVALLISUUS

3.1.1 Yleistä

Palopaikka on luonteeltaan vaarallinen. Työturvallisuus on aina muistettava palopaikalle mentäessä ja varustuksen on oltava tilanteenmukainen. Koska palotapahtumat ja -paikat voivat vaihdella erittäin suuresti, kaiken kattavaa varustuksen ja toimenpiteiden yleisohjetta on vaikea antaa.

Suojavaatetukseen kuuluvat ainakin turvakengät tai -saappaat, vettä hylkivä suojapuku, suojakypärä sekä suojakäsineet. Teräspohjaiset jalkineet suojaavat nauiloilta. Vettä hylkivä suojapuku antaa jonkunlaisen suojan myös myrkyllisiä ja syövyttäviä kemikaaleja vastaan. Tarvittaessa käytetään sopivaa hengityksensuojainta.

Palokunnalla, joka on ollut paikalla palon ja jäähtymisvaiheen aikana, on yleensä jonkinlainen arvio rakennuksen kunnosta.

Rakennuksen omistajalta tai haltijalta selvitetään rakennuksessa mahdollisesti olevat vaaralliset aineet.

Seuraavassa luetellaan muutamia vaaratilanteisiin liittyviä asioita.

3.1.2 Rakennuksen tai sen osien sortuminen.

Palon aikana rakennuksen osia tuhoutuu ja jäljelle jääneet osat menettävät lujjuutensa osittain tai kokonaan. Rakennus tai sen osia sortuu useimmiten palon aikana tai jäähtymisvaiheen alussa. On kuitenkin täysin mahdollista, että sortumisia (seiniä, katto, lattia) tapahtuu myös palon jälkeen. Osa rakennuksesta voi olla hyvin epävakaa, ja pieni muutos saattaa aiheuttaa sortumisen. Raivausvaihe on vaarallisin rakennuksen palonjälkeiselle sortumiselle.

Lattiat ja portaat saattavat olla niin heikossa kunnossa, että henkilön kuormitus aiheuttaa sortumisen ja putoamisen usean kerroksen matkalla. Ilman sortumistakin putoamisvaara on olemassa palon tekemien aukkojen takia. Heikko lattia saattaa kannattaa yhden henkilön, mutta usean henkilön paino saa sen sortumaan. On varottava muodostamasta henkilöryhmiä saman mielenkiintoisen kohdan, esimerkiksi epäilyllyn syttymiskohdan, ympärille. Jos palo todella on syttynyt siinä kohdassa, rakennuksen vauriot ovat todennäköisesti suurimmat juuri syttymiskohdan läheisyydessä, jossa myös sortumisen mahdollisuus on suuri. Lattian tai portaan sortumisvaaraa voidaan vähentää asettamalla niiden päälle tikapuut, jolloin kävelevän henkilön aiheuttama paine pienenee.

3.1.3 Sähköön liittyviä asioita

Palomiesten työturvallisuuden takia palokohteen sähkö katkaistaan yleensä jo ennen sammutustyön aloittamista. Ennen palonsyöttökimpuksen aloittamista on kuitenkin hyvä tarkistaa paikallisen sähköyhtiön kanssa että palopaikan sähkö todella on kytketty pois.

Seuraavat seikat voivat parantaa henkilökohtaista työturvallisuutta:

- Käsittele sähköjohtoja jännitteellisinä vaikka sähköt olisi kytketty pois.
- Tarkista yleismittarilla onko laite tai johto jännitteellinen vai ei.
- Selvitä tapahtuuko sähkönsyöttö mahdollisesti useammasta paikasta, onko kaikki varmasti kytketty irti ja onko mahdollisesti tuotu sähköä jatkojohdotuksella rakennuksen ulkopuolelta.
- Varo palopaikalle mennessäsi rakennuksen ulkopuolelle pudonneita sähköjohtoja, erityisesti jos ne ovat yhteydessä metalliaitaan tai muuhun sähköä johtavaan esineeseen tai veteen.
- Varo TV-antenneja ja muita metalliesineitä, jotka koskettavat sähköjohtoihin.
- Käytä tikapuita ym. varovasti, jos lähistöllä on sähköjohtoja.
- Sähkölaitteiden virta saattaa olla huomattava ja oikosulku voi johtaa voimakkaan valokaaren syntymiseen, mikä voi aiheuttaa huomattavia vahinkoja ja palovammoja.
- Älä usko, että kumisten jalkineiden eristekyky olisi riittävä kaikissa tilanteissa.
- Älä koskaan mene märkään tilaan, jos sähkön poiskytkeminen on epävarmaa, älä myöskään käsin kosketa sähkökytkimiä, jos itse olet kosketuksessa veteen.
- Älä käännä sähkökytkintä, jos epäillään että tilassa on palavaa kaasua, pölyä tai nestehöyryä. Kipinä voi aiheuttaa räjähdysriskin. Jos sähkö on kytkettävä pois, tee se kaukana räjähdysvaarallisesta tilasta.
- Varmista sähkölaitokselta yhteyshenkilö, johon voit nopeasti tarvittaessa ottaa yhteyttä.

3.1.4 Kaasut, höyryt, pölyt sekä räjähdykset

Kaasut, höyryt, pölyt

Tulipalon aikana muodostuu ja vapautuu erilaisia vaarallisia aineita kaasuina, höyryinä tai pölynä. Aineet voivat muodostua tulipalossa tai tulipalon seurauksena vaarallisia aineita sisältävät säiliöt voivat rikkoutua ja aineet vuotaa ympäristöön. Vaarallisista pölyistä voidaan erityisesti mainita asbesti, jota on yleisesti vanhoissa rakennuksissa. Hengityssuojaimia on erilaisia käyttöalueita varten

useita laatuja. Palon sammuttamisen jälkeen kosteus on kuitenkin yleensä riittävä pitämään ilmassa leijuvaa pölypitoisuutta alhaisena.

Räjähdyks- ja uudelleensyttymisvaara

Uudelleensyttymisvaara on yleensä vähäinen sammutustyön päättymisen jälkeen. Jos itsesyttyminen on palon syy, ja jos ainetta on riittävästi jäljellä palon jälkeen, uudelleensyttyminen mahdollistuu.

Räjähdyksivaara on mahdollinen esimerkiksi vuotavista säiliöistä tulevan kaasun, rakenteiden sortumisen nostattaman pölypilven, palavien nesteiden lammikoista tulevan höyryn tai paikalla olevien räjähdysaineiden takia.

Räjähdyksivaaran työturvallisuus

Räjähdyksen jälkeen rakenteiden vauriot saattavat olla suuremmat kuin tulipalossa. Lattioiden, seinien, kattojen tai koko rakennuksen sortumisvaara on silloin usein suurempi.

Polttoainekaasu-, -höyry- tai pölyräjähdyksissä peräkkäisten räjähdysten sarjat ovat tavallisia. Jos tutkimus alkaa heti räjähdysten jälkeen, siihen on varauduttava tukkimalla tai poistamalla kaasuvuodot tai palavien nesteiden lammikot ennen työn aloittamista.

Jos räjähdykseen liittyy räjähdysaineita tai varsinaisia pommeja, on mahdollista, että paikalla on räjähtämätöntä ainetta. Sitä on räjähdyksessä voinut sinkoutua laajallekin alueelle ympäristöön. Alueen tutkinnassa etsitään ainetta erityisen huolellisesti. Jos räjähtämätöntä ainetta löydyy, siihen ei saa koskea eikä sitä saa siirtää. Alue tyhjennetään ihmisistä, eristetään ja räjähdysaine- tai pommi-asiantuntijat kutsutaan paikalle selvittämään tilannetta.

3.2 OLEMASSA OLEVAT TIEDOT

Palokohteesta jo olemassa olevia tietoja käytetään hyväksi. Sellaisia on ainakin seuraavissa asiakirjoissa:

Palotarkastus

Laissa palo- ja pelastustoimesta säädetään, että palovaaran ehkäisemiseksi ja henkilöturvallisuuden lisäämiseksi on toimitettava palotarkastuksia. Palotarkastus toimitetaan kohteen mukaan tietyin väliajoin, mutta palopäällikkö voi tarvittaessa määrätä sen muulloinkin. Palotarkastuksen toimittaa palopäällikkö, palotarkastaja tai muu kunnan palo- ja pelastustoimen virassa oleva henkilö sen mukaan kuin johtosäännössä on määrätty.

Lisäksi säädetään asetuksessa palo- ja pelastustoimesta, että nuohoojan on nuohotessaan tarkastettava tulisijojen savu- ja ilmanvaihtohormien sekä tikkaiden ja nuohoustelineiden kunto. Viasta tai puutteellisuudesta on huomautettava asianosaiselle sekä ilmoitettava palotarkastuksesta vastaavalle viranomaiselle.

Palonsyytä selvitetessä tarkastetaan, milloin palotarkastus on viimeksi tehty palaneessa kohteessa, onko havaittu vikoja tai puutteita, laadittu palotarkastuspöytäkirja ja onko muita havaintoja, jotka voivat edistää palonsyyn selvittämistä. Tarkistetaan myös nuohouksen yhteydessä tehtyjä havaintoja.

Palonhavaitsemiseen ja torjuntaan liittyvät asiakirjat:

- Automaattisten paloilmittimien viestit
- Aluehälytyskeskuksen pöytäkirjat

Rakennukseen liittyviä asiakirjoja:

- Tiedot rakennuksen käyttötarkoituksesta sekä omistajan ja/tai käyttäjän tiedot olosuhteista ennen paloa
- Rakennuspiirustukset
- Sähköpiirustukset
- Kaasuputkistopiirustukset

Muut, esim.

- Erilaisten valvonta-, säätö- ym. laitteiden rekisteröimät tiedot
- Tiedot sähkönjakelun katkeamisesta tai katkaisusta
- Tiedot rakennukseen liittyvien puhelinkeskusten toiminnasta
- Palotapahtumiin liittyvien laitteiden ja koneiden käyttöohjeet, sähköpiirustukset ja huoltokirjat

Kun halutaan selvittää rakennukseen tullut puhelinliikenne erilaisten ajoitusten tekemiseksi, puhelinyhtiöihin on otettava yhteyttä parissa päivässä, sillä tietoja ei säilytetä kauemmin.

3.3 VALOKUVAUS

3.3.1 Yleistä

Palopaikan valokuvauksella täydennetään ja selvennetään tehdyt havainnot. Palopaikalta otetut kuvat havainnollistavat usein tilanteen paremmin kuin kirjoitettu teksti. Valokuvista saattaa joskus löytyä yksityiskohtia, jotka ovat jääneet huomaamatta kuvien ottohetkellä. Valokuvia otetaan tarpeen mukaan. Yleensä on parempi ottaa kuvia liian paljon kuin liian vähän.

Valokuvaamisen ohella voidaan myös videokuvata palopaikkaa. Videokuvaus antaa jatkuvasti muuttuvan kuvakulman vuoksi hyvän kokonaiskuvan

palopaikasta. Valokuva on kuitenkin tarkempi, ja videokuvaus on lähinnä valokuvausta täydentävä väline. Jos palon aikana sen sijaan voidaan videokuvata, siitä voi olla huomattavaa apua palon kehittymisen ja palonsyyn selvittämisessä.

Valokuvien ottaminen on aloitettava mahdollisimman varhain, mahdollisuuksien mukaan jo tulipalon aikana. Jos palo on näkyvässä matkalla sinne, autosta otetut valokuvat voivat antaa arvokasta tietoa palon kehittymisestä. Tulipalon aikana otetuissa valokuvissa tulee olla aika sekunnin tarkkuudella.

Joissakin tapauksissa valokuvaaminen on tehtävä nopeasti palon jälkeen, kuten

- jos rakennus on sortumassa tai se on purettava välittömästi turvallisuussyistä
- jos rakennuksen sisältö voi aiheuttaa ympäristölle vaaraa ja tämä on välittömästi torjuttava
- jos rakennuksessa suoritetaan laajoja raivaustöitä, esimerkiksi etsitään eloonjääneitä ja loukkaantuneita ihmisiä.

Yleensä on kuitenkin odotettava että rakennus on jäähtynyt, sekä turvallisuussyistä että valokuvaamisen onnistumisen takia, koska savu ja höyry näkyvät sumuna valokuvissa ja tuhoavat kaikki yksityiskohdat. Pyritään ottamaan valokuvat valoisaan aikaan, ja otetaan vain välttämättömät ensimmäiset kuvat palon tapahtuma-aikaan.

Koska valokuvattava kohde on usein tumma esine tummalla pohjalla tummassa ympäristössä, salamavalon käyttö on välttämätöntä. Tämä voi olla yhdistettynä erillisten valonheittimien käyttöön. Otetaan huomioon, että salama voi muuttaa kohteen ulkonäköä. Esimerkiksi savujäljet saattavat esiintyä vaaleampana tai häipyä kokonaan tai salaman antamat varjot voidaan tulkita väärin palojäljiksi. Valoisissakin olosuhteissa on kiinnitettävä huomiota oikeaan valotukseen tummien kohteiden kuvauksessa. Statiivin käyttö vähentää epäterävyyttä kun käytetään pitkiä valotusaikoja. Värifilmi on suositeltava, koska yksityiskohdat näkyvät paremmin.

Jos käytetään ammattivalokuvaajaa, hänellä on harvoin tietämystä palojäljistä tai oleellisista kohteista. Kuvaajaa on silloin opastettava, tai vielä paremmin, tutkija ottaa itse valokuvat.

3.3.2 Kuvien ottaminen

Tulipalon aikana

Tulipalon aikana otetut valokuvat voivat huomattavasti helpottaa palon kehittymisen arviointia. Tästä syystä kuvissa on oltava kellonaika sekunnin tarkkuudella, jotta niistä saataisiin mahdollisimman suuri hyöty. Kameran päiväyriin kellonaikaa verrataan reaaliaikaan ja kello joko asetetaan tarkkaan aikaan tai ero merkitään muistiin. Valokuvaaminen aloitetaan jo palopaikalle mentäessä heti kun palo tai palon jälkiä on näkyvissä. Jos kamerassa ei ole kelloa, operatiivisen tilanteen aikana otettujen kuvien aika ja kohde on merkittävä muistiin, jotta niistä voitaisiin myöhemmin tunnistaa kohteet ja määrittää tapahtuman aika.

Palon aikana otetuilla valokuvilla voidaan myös dokumentoida sammutustyötä. Tähän kuuluu sekä automaattisen sammutuslaitteiston että palokunnan sammutustyöhön liittyvä toiminta, selvitykset, hyökkäysreitit, sammutusraivaus ym. Valokuvilla voidaan selvittää rakennuksen eri osien tila palon eri vaiheissa, olivatko ovet tai ikkunat auki, kiinni, murrettuja ennen palokunnan saapumista, palokunnan murtamia tai rikkoutuneita itse palossa.

Tulipalon jälkeen

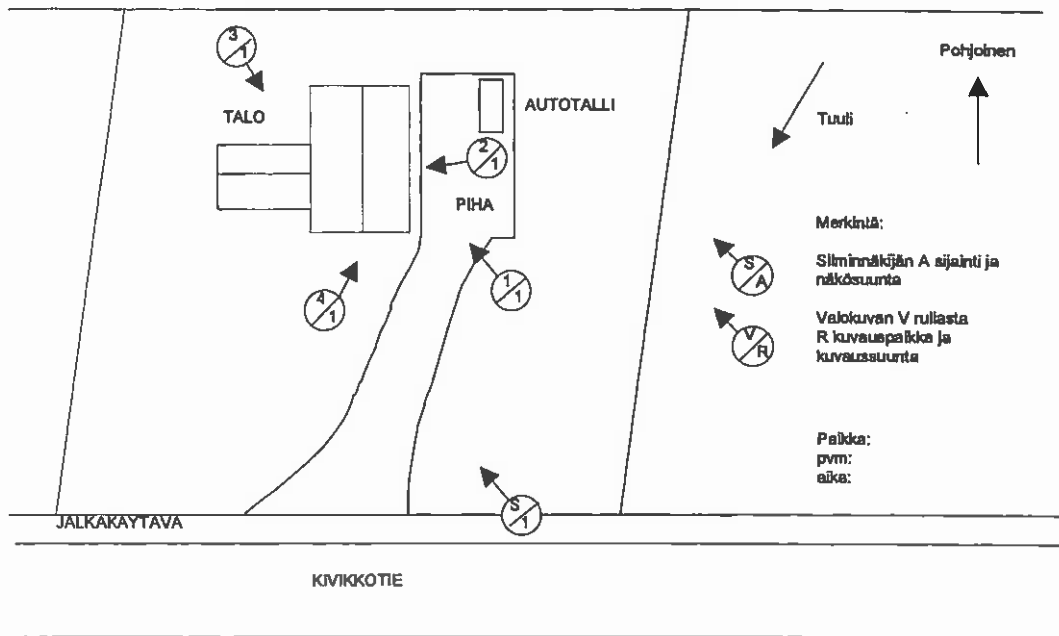
Palopaikalta otetut valokuvat esittävät rakenteen ja sen sisällön niin kuin se on palon jäljiltä. Yleensä valokuvat otetaan alkaen ulkopuolelta siirtyen sisäpuolelle, vähemmän palaneesta enemmän palaneeseen ja huipentumana ovat syttymiskohtaan ja syttymissyhyyn liittyvät paikat. On hyödyllistä valokuvata koko kohde, myös palon jäljiltä säästyneet ehjät osat, eikä pelkästään vaurioituneita osia. Tästä voi olla hyötyä, kun halutaan selvittää savujälkien laajuutta tai kun pyydetään todistusta vaurioitumattomista alueista.

Silminnäkijöiden tietystä paikasta tekemiä havaintoja täydennetään ottamalla mahdollisimman tarkasti valokuvia samalta paikalta ja samalla kuvakulmalla kuin todistaja on ilmoittanut. Valokuva selventää huomattavasti todistajan lausuntoa ja voi joko vahvistaa tai heikentää sitä.

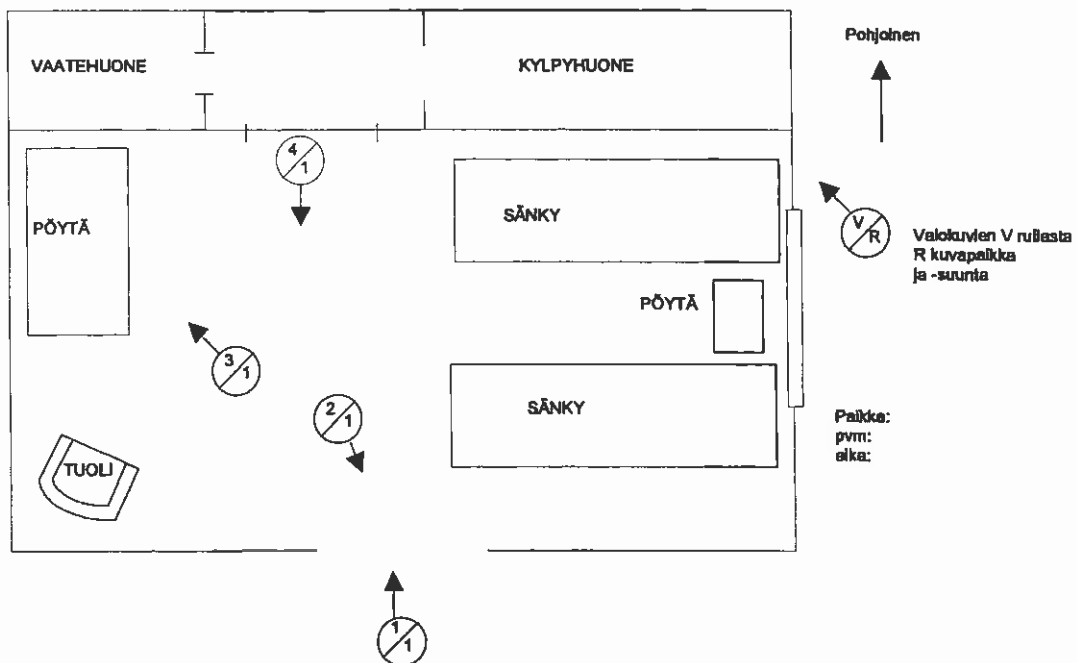
Valokuvien ottokohdat merkitään huolellisesti rakennuksen pohjapiirrokseseen, tai ellei tällaista ole, itse tehtyyn piirrokseseen kohteesta. Valokuvat numeroidaan, ja vastaavat numerot merkitään piirrokseseen sekä osoitetaan kuvakulmat nuolilla. Piirros täydennetään lisäkommenteilla tarpeen mukaan. Merkitään myös mihin kuvarullaan kuvat kuuluvat.

Valokuvapiirrokseseen merkitään myös palopaikka, päivämäärä, kellonaika, valokuvaajan nimi ja muut asiaa selventävät kommentit. Ilmansuunnat ja tuulen suunta merkitään piirrokseseen. Ennen sammutustyön päättymistä otettujen valokuvien tarkat ottohetket merkitään myös piirrokseseen. Esimerkkejä valokuvapiirroksista annetaan kuvassa 3.1.

a)



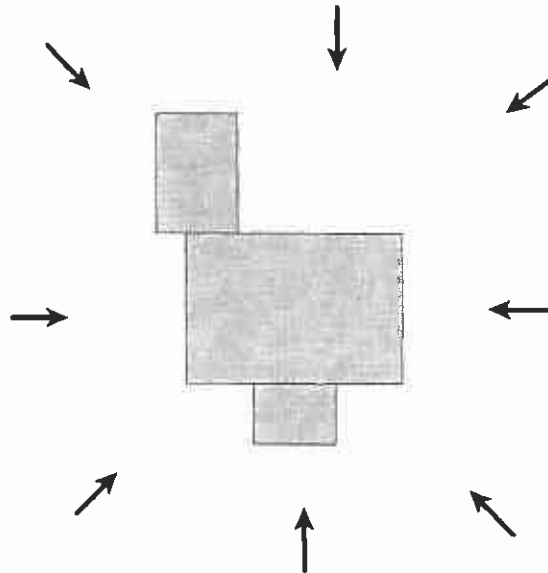
b)



Kuva 3.1. Esimerkkejä kuvista, joihin on merkitty valokuvien kuvauspaikat, kuvaussuunnat sekä silminnäkijän sijainti ja näkösuunta a) rakennuksen ympäristössä ja b) huoneessa NFPA 921 (1995) mukaan.

Ulkopuoliset valokuvat

Selkeyden vuoksi on hyvä ottaa ulkopuolisia valokuvia niin, että saadaan kuvasarja palopaikan sijainnista. Tässä voi käyttää mahdollisuuksien mukaan katukilpiä, osoitenumeroita tai helposti tunnistettavia maamerkkejä. Ulkopuoliset valokuvat otetaan eri suunnilta, jotta rakenteen kaikki osat ja niiden kuuluminen yhteen kokonaisuuteen saadaan selvästi esiin (kuva 3.2). Tunnistamisen helpottamiseksi jo muistikirjaan kirjoitetaan: rakennus pohjoisesta, kadun puolelta, rakennus etelästä pihan puolelta jne., jolloin kuvan 3.1 piirroksen tekeminen tulee helpommaksi. Kuvataan rakenteiden vauriot ja palojäljet, joilla voidaan mahdollisesti selvittää palon syntyä ja leviämistä. Rakennevauriot, kuten rikkoutuneet ikkunat, ovet ja seinät, sekä rakenteelliset virheet tai puutteet kuvataan yksityiskohtaisesti. Tämäntapaiset vauriot saattavat vaikuttaa palon kehittymiseen ja palonsyytutkimuksen lopputulokseen. Kauempana palaneesta kohteesta olevia jälkiä, kuten paineaallon aiheuttamia vaurioita tai räjähdyksessä sinkoutuneita kappaleita, valokuvataan myös.



Kuva 3.2. Kohde valokuvataan kaikista suunnista. NFPA 921 (1995) mukaan.

Yksityiskohtien valokuvaus yhdistetään kokonaisuuteen ottamalla ensin kuvia suurelta etäisyydeltä. Tämän jälkeen kuvataan kohde yhä lähempää, mikäli mahdollista samassa kuvakulmassa siten, että saadaan sarja peräkkäisiä kuvia kokonaisuudesta yksityiskohtiin. Sarjan eri kuviin pyritään ottamaan jotain mittakaavaa osoittavaa.

Kokonaiskuva tilanteesta saadaan ilman laajakulmaobjektiiviäkin ottamalla toisiinsa rajoittuvia kuvia sopivalta etäisyydeltä. Sijoittamalla valmiit kuvat vierekkäin saadaan melko yksityiskohtainen kuva koko tilanteesta. Tällainen "kuvamosaiikki" kannattaa rakentaa siten, että viereisten kuvien vastaavissa

reunoissa on kuvakohtien helposti tunnistettavat merkit. Tämä helpottaa kuvien yhdistämistä. Kuvamosaiikin ottaminen onnistuu parhaiten, kun käytetään kameraa jalustalla. Kameran asetukset pidetään samanlaisina ja kuvat otetaan samoissa olosuhteissa.

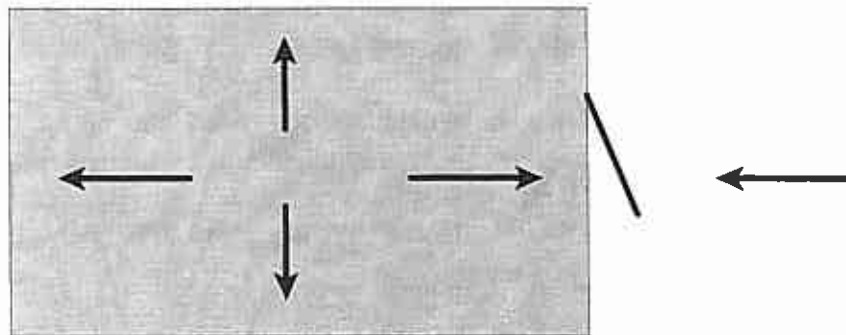
Ilmakuvat

Valokuvia voi vielä täydentää ilmasta tai korkealta paikalta otetuilla kuvilla. Kuvat voidaan ottaa nostolava-autosta, naapurirakennuksesta, mäeltä, lentokoneesta tai helikopterista.

Sisäpuoliset valokuvat

Kun valokuvataan rakennusta sisältä, muuttunut valaistus ulkoilmaan verrattuna otetaan huomioon, samoin sen vaihtelu rakennuksen eri osissa. Valokuvataan kaikki savu-, lämpö- ja palamisjäljet sekä tulipalon kehitykseen vaikuttavat ilmanvaihtoaukot, niin alkuperäiset kuin palon aiheuttamat.

Kaikki huoneet epäillyn syytymiskohdan läheisyydessä valokuvataan (kuva 3.3), nekin, joissa ei ole palovaurioita. Kaapit ja komerot valokuvataan myös sisäpuolelta. Pienessä rakennuksessa tämä voi tarkoittaa kaikkien huoneiden kuvaamista, mutta suurissa rakennuksissa kauempana olevien vaurioitumattomien huoneiden kuvaaminen voi olla tarpeetonta, ellei ole syytä taltioida huoneiden sisältöä, niiden olemassaoloa, puuttumista tai tilaa.



Kuva 3.3. Huoneen kaikki seinät valokuvataan sekä ovet molemmin puolin. NFPA 921 (1995) mukaan.

Kaikki lämpöä tuottavat laitteet syytymiskohdan lähellä kuvataan. Huonekalut kuvataan alkuperäisessä asemassa ennen rekonstruointia ja sen jälkeen. Huonekalujen tai muiden esineiden suojaamat alueet kuvataan myös. Ikkunoiden ja ovien asento ja tila kuvataan.

Valokuvataan sisäiset palontorjuntalaitteet kuten sprinklerit, ilmaisimet, sammuttimet, palo-ovet ja palopellit. Pysähtyneet kellot valokuvataan ja selvitetään niiden pysähtymisen syy ja liittyminen palotapahtumiin.

Lämpö- (kaasu, öljy) ja sähköliittymiin kuuluvat säätölaitteet ja mittarit, niiden lukemat, säätimien asennot ja sulakkeet valokuvataan yksityiskohtaisesti.

Erilliset, palon kannalta oleelliset esineet valokuvataan alkuperäisessä asennossa palopaikalla. Yksityiskohtia voi tuoda esille selkeämmin kuvaamalla esinettä valkoista taustaa vastaan. Talteenoton jälkeen yksityiskohtia voidaan tarpeen mukaan kuvata lisää laboratoriossa. Raivauksen aikana otetaan valokuvia järjestelmällisesti sitä mukaa kun palojäännösten kerrokset paljastuvat (vertaa kohta palopaikan raivaus 4.4.6). Valokuvat osoittavat siten sekä esineiden alkuperäisen sijainnin että niiden kunnan. Mahdollisesti havaitsematta jääneet seikat voidaan jälkikäteen tunnistaa valokuvista. Esineitä valokuvattaessa asetetaan niiden viereen mittanauha tai viivoitin kohteen koon selvittämiseksi. Tämä tehdään sen jälkeen, kun esineitä on valokuvattu alkuperäisessä tilanteessa. Mittakeppi voidaan asettaa myöskin alkuperäisen kohteen päälle, ellei tämä muuta tilannetta tai aiheuta muuten häiriöitä.

3.4 MUISTIINPANOT

Palon kehittymisen ja operatiivisen toiminnan tapahtumista aika on palonsyyn tutkijan tärkein työ- ja todistusväline. Erityisesti palo- mutta myös poliisiviranomaisten tulisi kiinnittää erityisen tarkkaa huomiota, että he rekisteröivät kaikkien havaintojensa ajat mahdollisimman tarkasti. Hälytyskeskusten raporteista tapahtumien aika voidaan sitoa todelliseen kellonaikaan noin minuutin tarkkuudella ja automaattisen hälytyksen tapahtuessa vieläkin tarkemmin. Edellä on huomautettu, että kameroissa ja videolaitteissa tulisi olla sekunnin tarkkuudella rekisteröivät kellot. Ellei näin ole, havaintoaika olisi heti tekohetkellä merkittävä muistiin. Kaikkien ammatillisesti havaintoja tekevien tulisi pitää kellonsa sekunnin tarkkuudella virallisessa ajassa, mutta varmistukseksi tilanteen jälkeen olisi heti tarkistettava kaikkien havaintoihin käytettyjen kellojen ajat ja merkittävät tilanteet muistiin. Myös palopaikalta havaintoja mahdollisesti tehneiden laitteiden kuten varsinaisten kellojen, tietokoneiden, kassakoneiden, piirtureiden ja muiden rekisteröivien mittareitten kellojen tarkistus viralliseen aikaan nähden olisi tehtävä mahdollisimman nopeasti tapahtuman jälkeen.

Lisäksi olisi kiinnitettävä huomiota savusukeltajien varustamiseen mikrofoneilla, jotta he voisivat kertoa havainnoistaan itse palon läheisyydessä sammutustyön johtajalle tai lähimmälle esimiehelleen. Erityisen tärkeää olisi tietää, milloin ensimmäinen savusukeltaja pääsee kosketukseen itse palopesäkkeen kanssa. Nämä keskustelut tulisi nauhoittaa ja säilyttää tietyn ajan. Palokunnan tekemään tilastoraporttiin tulisi merkitä kyseinen aika ja savusukeltaja voisi kertoa, minkä kokoinen palo oli hänen ensi havaintonsa perusteella. Muut tiedot keskustelunauhalla purettaisiin vain erityisen tarpeen vaatiessa reaaliaikaista tietoa palon kehittymisestä, joka ei ole muulla tavoin hankittavissa.

Palotapahtumien kulun havainnollistamiseksi tutkija kirjaa kaikki merkittäviksi arvioimansa havainnot myös lineaariselle aikajanalle, josta on yhdellä silmäyksellä nähtävissä oleelliset seikat. Aikajanan piirtämisestä taulukkolaskentaa käyttäen on yksityiskohtainen esimerkki luvussa 6.

Sitä mukaa kun kohteen palonsyyn tutkinta etenee, havainnot on merkittävä paperille muistiin. Havainnoilla täydennetään ja selvennetään myös valokuvia ja piirroksia esimerkiksi merkitsemällä laitteiden ja esineiden malli- tai sarjanumerot, esineiden tunniste-, materiaali- ja valokuvapiirroksen tiedot.

Paperimuistiinpanojen täydentäjänä voi olla sanelukone tai salkkumikrotietokone, mutta niillä ei saisi korvata kokonaan paperimuistiinpanoja, sillä kovin teknisten välineiden käytössä on huomattava vaara, että ainutlaatuinen aineisto menetetään laitevian, toimintahäiriön tai laitteen väärän käytön vuoksi.

3.5 PIIRUSTUKSET

Hyvä piirros sisältää tietomäärän, jonka esittämiseen tarvittaisiin monta tekstisivua. Piirroksen tulee olla tiivis, tehokas ja yhdellä silmäyksellä ymmärrettävissä. Piirros selkeyttää ja jäsentää tutkimusta. Sitä mukaa kun piirroksen merkitään tehdyt havainnot, palotapahtumien kulku hahmottuu selkeämmin.

Jos rakennuksesta on käytettävissä sopivia rakennuspiirustuksia, työn dokumentointi helpottuu. Ellei ole, tutkijan on vapaalla kädellä itse piirrettävä kuvat palopaikalla. Tämä karkea piirros piirretään puhtaaksi myöhemmin. Piirustus tehdään mahdollisimman tarkasti mittakaavaiseksi ja siihen merkitään palojäljet, palovauriot, huonekalujen sijainti, raivatut alueet ja raivauserrokset, ovien, ikkunoiden ja muiden aukkojen sijainti, asento ja tila, näytteenottoapaikat, valokuvien ottopaikat ja -suunnat sekä kaikki muut palon kannalta oleelliset seikat (luku 4). Piirustuksiin merkitään myös kaikki oleelliset mitat ja etäisyydet. Palon leviämisseuunta voidaan merkitä kuviin nuolilla.

Ilmansuuntien merkitseminen piirustuksiin helpottaa viittaamista huoneessa oleviin eri kohtiin. Koska tuuli vaikuttaa usein palon kehitykseen ja joskus syntyymiseenkin, tuulensuunta merkitään piirroksiin.

Kaikkien tietojen sullominen yhteen piirustukseen ei ole aina järkevää eikä mahdollistakaan. Piirustuksien laajuudesta, lukumäärästä ja yksityiskohtaisuudesta päätetään tapauskohtaisesti. Esityksen selkeys ja ymmärrettävyys on pidettävä johtotähtenä. Kuvissa 3.4 - 3.6 annetaan esimerkkeinä, miten huoneiston olohuoneessa syttyneen palon jäljet voidaan esittää.

Kaikissa palonsyyselvityksissä olisi oltava ainakin yksi piirros, josta käy ilmi huoneiden, portaiden, ovien ja ikkunoiden sijainti sekä palovauriot ja palojäljet. Tämä riittää usein palon syyn selvittämiseksi helpoissa tapauksissa. Monimutkaisemmissa tapauksissa voidaan tarvita rakennuksen rakennuspiirustukset, joista selviävät rakenteen lisäksi mm. LVI-, sähkö-, palohälytys- ja palontorjuntajärjestelmät.

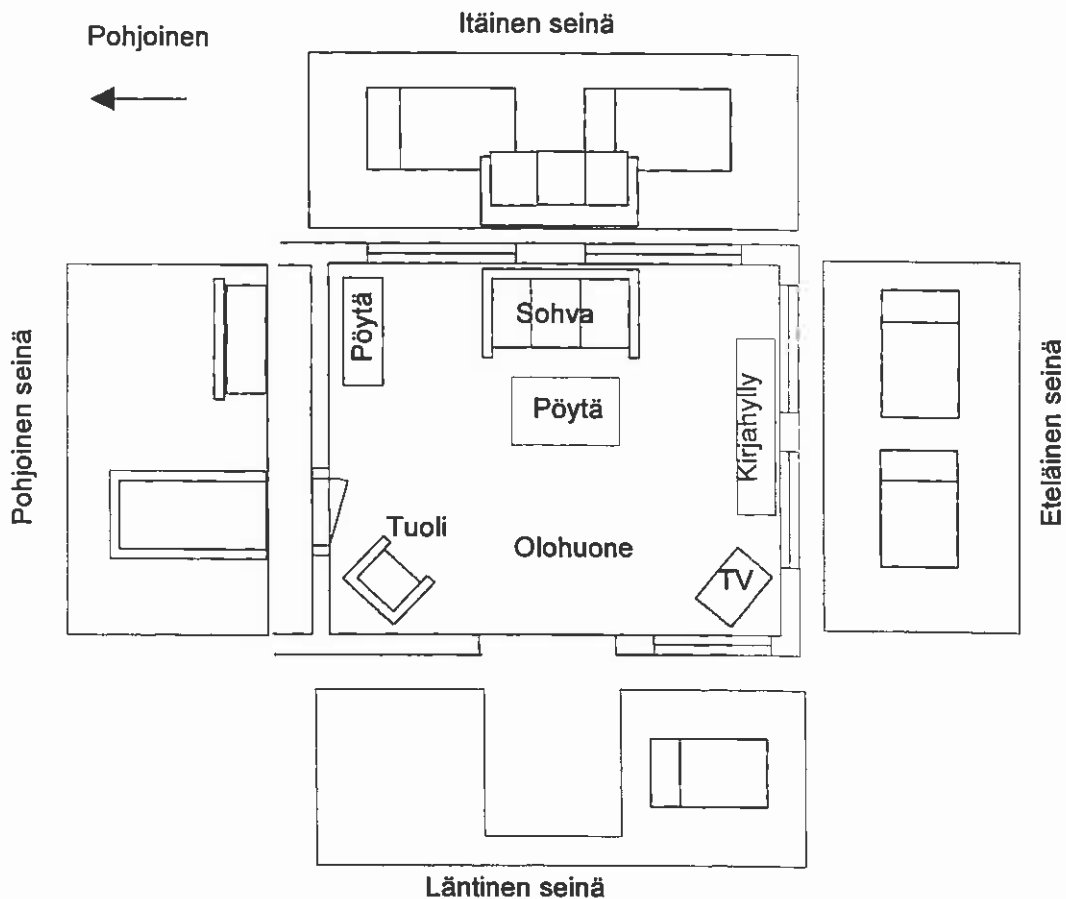
Vaativien kohteiden, esimerkiksi suurten teollisuuslaitosten tai hotellien, paloissa tarvittava aineisto saattaa paisua hyvinkin mittavaksi.

On selkeintä käyttää standardoituja, yksikäsitteisiä lyhennyksiä ja merkintöjä niin paljon kuin on mahdollista. Omat ja vähän tunnetut lyhenteet luetteloidaan piirroksen viereen.

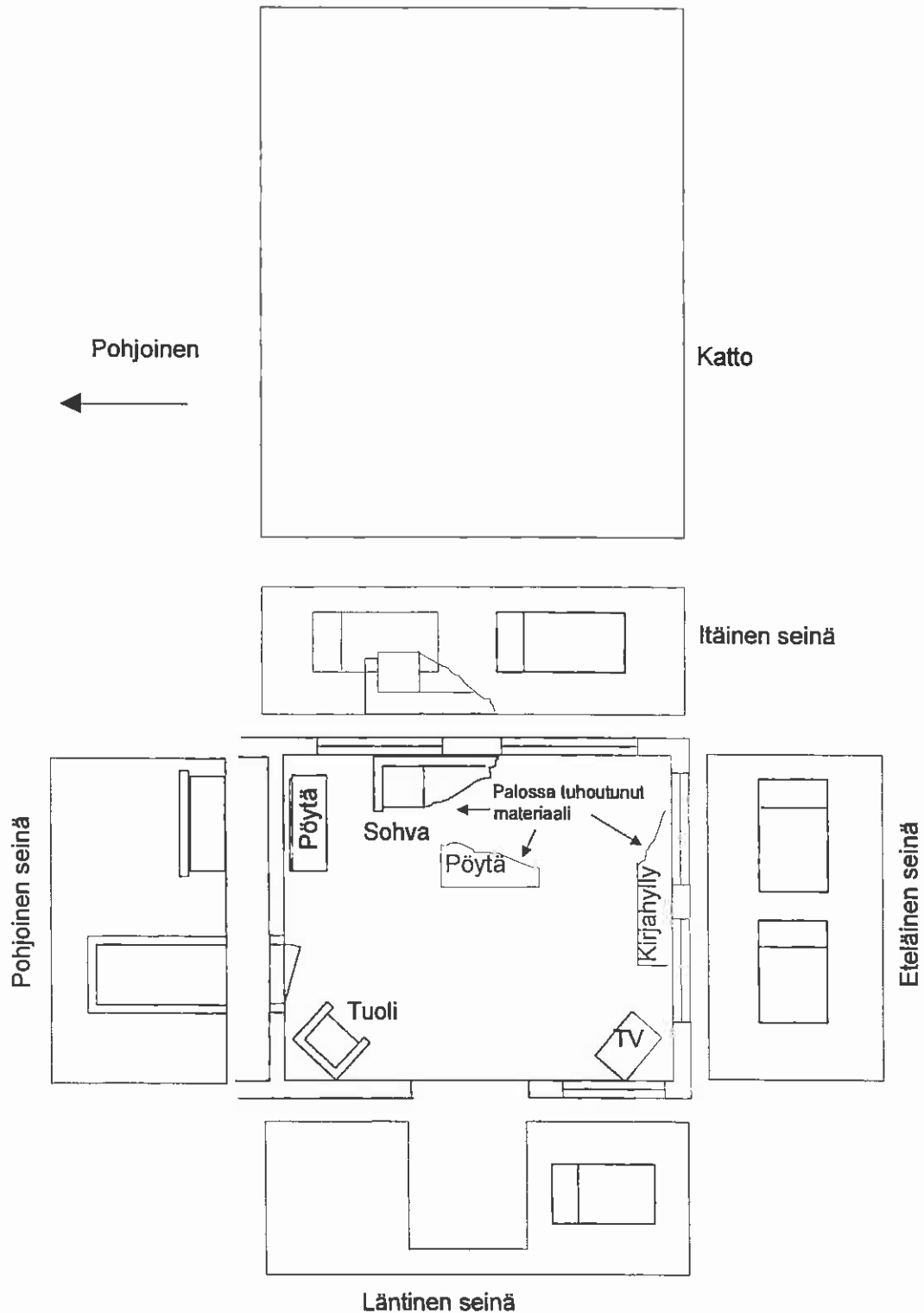
Piirrettäessä mittakaavaan jo palopaikalla mahdolliset mittausvirheet paljastuvat ja ne voidaan korjata heti. Tarkka piirustus auttaa itse paikalla suoritetuissa tutkimuksissa paremmin kuin huolimaton sutaisu.

On mahdollista, että monet esineet on siirretty toiseen paikkaan sammutus- tai raivaustöiden aikana. Tämä sijainti ei välttämättä ole oleellinen, mutta esineen sijainti ennen paloa ja palon aikana on palonsyytutkimukselle tärkeä. Sijainti ennen paloa voi selvittää todistajien avulla tai esineen jättämistä jäljistä. Esineiden sijainti palon aikana voi selvittää palonsyytutkimuksen raivaustöiden yhteydessä. Esineiden sijainti ennen paloa ja sen jälkeen on joskus selkeää esittää kahdessa erillisessä piirustuksessa (esimerkki kuvissa 3.4 ja 3.5).

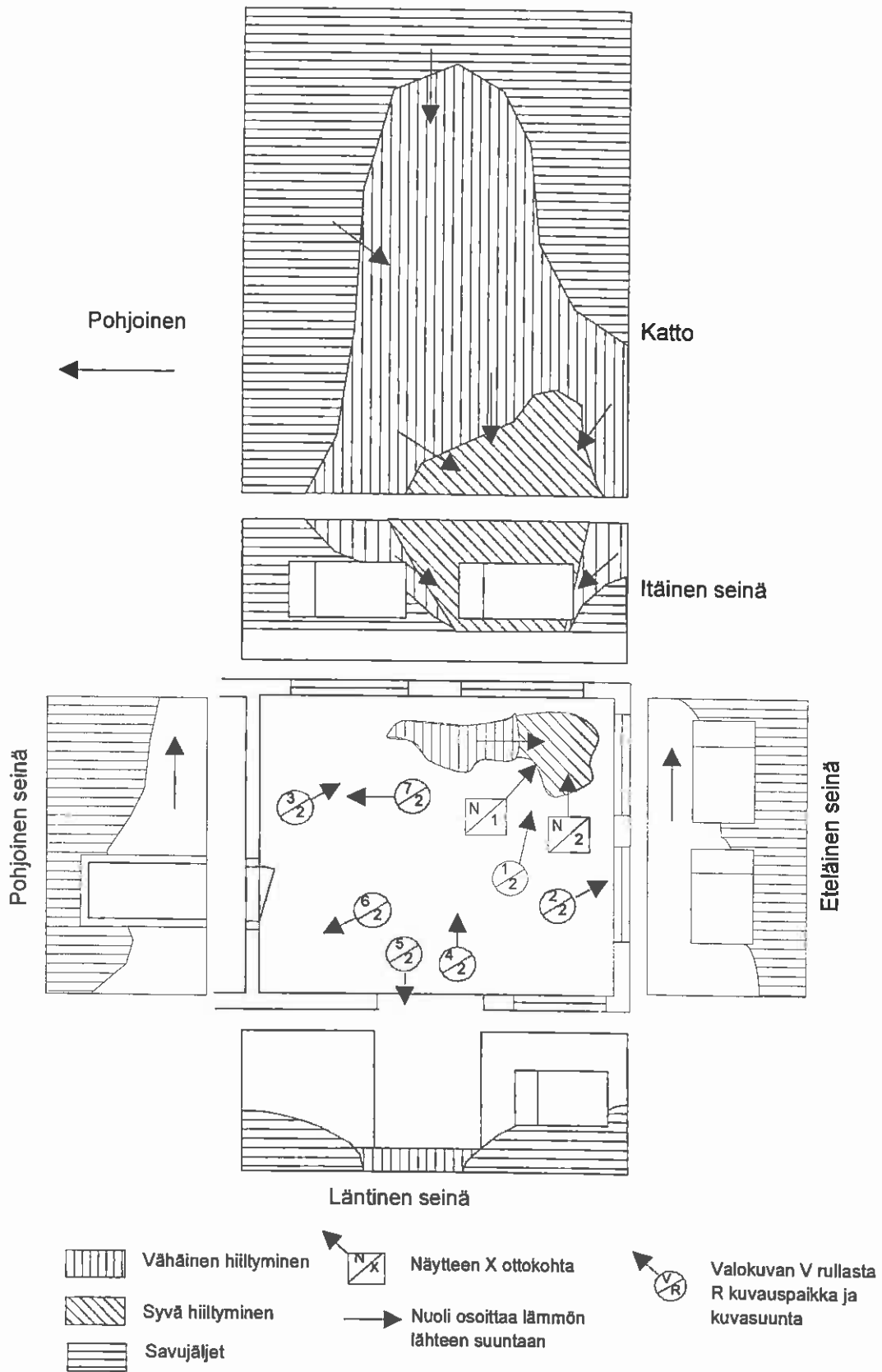
Esineiden kartoituksessa kannattaa aloittaa suurimpien, kuten huonekalujen, merkitsemisestä piirustuksiin. Pienempien esineiden sijainti on helpompi merkitä suhteessa suurempiin.



Kuva 3.4. Esimerkkipiirros. Olohuone kalusteineen ennen tulipaloa. Seinät kaadetaan levityskuvaksi kullekin sivulle. NFPA 921 (1995) mukaan.



Kuva 3.5. Esimerkkipiirros: Olohuoneen rekonstruointi palon jälkeen; vaurioitunut kalustus on alkuperäisillä paikoillaan. Välikatto on esitetty levityskuvana siten, että se liittyy oikealla tavalla sitä lähinnä esitettyyn seinään. NFPA 921 (1995) mukaan.



Kuva 3.6. Esimerkkipiirros: Palojäljet olohuoneessa, näytteenottoaikat ja valokuvauspaikat kuvaussuuntineen. NFPA 921 (1995) mukaan.

3.6 FYYSISET TODISTEET, NÄYTTEIDEN OTTAMINEN

3.6.1 Palopaikkatutkintaan liittyvät kemialliset näytteet

3.6.1.1 NÄYTTEIDEN OTTO PALOPAICALTA

Palopaikalta voidaan tutkinnan yhteydessä ottaa lukuisia näytteitä palon syttymissyyn selvittämiseksi ja varmistamiseksi. Jos syttymiselle ei ole luonnollista selitystä, esim. varomaton tulenkäsittely tai salaman isku, ja epäillään tahallista sytyttämistä, näytteiden otto on tärkeää tapahtumien toteen näyttämiseksi. Näytteidenottokohdat valokuvataan ja/tai piirretään näytekartalle. Näytteitä otettaessa on myös estettävä näytteiden saastuminen materiaalin vaihdon välityksellä. Tämän vuoksi näytteiden ottajan on käytettävä puhtaita ottovälineitä ja suojavaatetusta (kertakäyttöiset haalarit, hiussuoja, jalkinesuojat, käsineet jne.). Palopaikalta otetut näytteet tutkitaan laboratoriossa ja niistä saadut erilliset lausunnot kootaan yhtenäiseksi tutkinnan osaksi.

3.6.1.2 PALOPAIKKATUTKINTAAN LIITTYVÄT KEMIALLISET NÄYTTEET

Mikäli palopaikalla todetaan viitteitä tahallisesta sytyttämisestä, esim. useita palopesäkkeitä, on hyvä ottaa erityyppisiä kemiallisia näytteitä. Näytteen otto-mahdollisuuksiin vaikuttaa tietenkin kohteen palamisaste. Sytyttäessään paloa tahallisesti tuhopolttajat käyttävät usein palavia nesteitä esim. moottoribensiiniä. Palo voi saada alkunsa myös varomattomasti käsitellyistä itsestään syttyvistä tai räjähtävistä aineista.

Jos kohde, esim. rakennus tai auto, ei ole täysin palanut, voidaan mahdollisesti tehdä päätelmiä siitä, onko siihen murtauduttu ennen palon sytyttämistä. Murtautumisen jälkiä voidaan etsiä lukoista, ovien karmeista ja ikkunoista. Mikäli tekijä on kulkenut rikutun ikkunan läpi, voi säröisen lasin reunoihin jäädä tekijän vaatteista kuituja, hiuksia tai verijälkiä, joita kaikkia voidaan käyttää epäillyn tunnistamiseen.

Palopaikka ja sen ympäristö on tarkastettava myös epäillyn mahdollisesti jättämien sormen-, jalkineen- ja autonjälkien löytämiseksi. Paloon liittyvät uhkauskirjeet, viestilaput jne. on poliisin lähetettävä rikostekniseen laboratorioon käsiala-, konekirjoitus- tai sormenjälkitutkimukseen.

3.6.1.2.1 PALAVAT NESTEET

Palojätteenäytteitä otettaessa on muistettava, että näytteistä etsittävät palavat nesteet ovat herkästi haihtuvia. Tämän vuoksi näytteet on otettava mahdollisimman pian palon jälkeen. Näyte kerätään syttymiskohdasta, sen ympäriltä ja alapuolelta, paikoista joihin voi kuvitella nesteen imeytyneen. Näytteen tulisi olla huokoista materiaalia kuten puuta, paperia, tekstiiliä, lattiamateriaalia, eristeitä, jne.

Auto- ja ajoneuvopaloissa näytteiksi irrotetaan puukolla alin eristemattokerros jalkatiloista ja pehmusteita istuimista mikäli niitä on vielä jäljellä. Mahdollisia ovat myös maanäytteet auton alta ja ympäriltä.

Sytyttäjäksi epäillyn päällä olleet vaatteet voidaan myös ottaa näytteeksi. Tällöin vaatteet pakataan nailonpussisiin kuten palojäte.

Kontaminaation välttämiseksi näytteet otetaan puhtailla muovi- tai metallilastaimilla. Välineet pestään huolellisesti ennen seuraavien näytteiden ottoa. Suositeltavaa on käyttää kertakäyttövälineitä ja -käsineitä.

Näytteet otetaan erikoisvalmisteisiin nailonpussisiin, joiden välittäjänä toimii Poliisin Tekniikkakeskus. Tavalliset muovipussit eivät pidä sisällään palavia nesteitä, jotka voivat olla voimakkaita liuottimia. Näytemäärä on noin 1 - 2 litraa. Pussit suljetaan huolella kiertämällä pussin suu rullalle, tekemällä solmu, taivuttamalla pussin suu alas ja kiinnittämällä solmun alapuolelle nippuside.

Näytteeksi sopivat myös nesteen kuljetukseen käytetyt astiat, tyhjätkin, joissa voi olla palavaa nestettä kaasuna. Palavaa nestettä sisältävät astiat suljetaan huolella ja pakataan nailonpussisiin kuljetuksen ajaksi.

Palavien nesteiden näytepussisiin ei saisi kerätä metallia, nauvoja, lasinsirpaleita eikä muita teräviä esineitä, jotka voisivat rikkoa näytepussin. Jos nämä ovat ilmeisiä todisteita, ne pakataan asianomaisella tavalla erikseen.

3.6.1.2.2 ITSESTÄÄN SYTTYVÄT AINEET

Epäiltäessä palon saaneen alkunsa itsestään syttyvistä aineista, ennen mahdollista näytteidenottoa tulisi ottaa yhteys rikosteknisen laboratorion tutkijoihin. Mikäli tarkempaa ohjeistusta ei ole, voidaan jätettä ottaa näytteeksi 1 - 2 litraa palojätepussiin.

Kuivuvat öljyt, kuten pellavaöljy ja hamppuöljy, hapettuvat kovettuessaan eli polymerisoituessaan. Tällöin kehittyä lämpöä ja itsestään syttyminen on mahdollista. Näiden ja muidenkin öljyjen hapettuminen on voimakasta jähmeän aineen pinnalla, joka saattaa katalysoida reaktioita. Kun öljy on imeytyneenä huokoiseen aineeseen (paperi, trasseli, kangas, sahanpurut jne.), se leviää laajalle pinta-alalle jopa yhden molekyylikerroksen paksuudelta. Pinnalla tapahtuva hapettuminen yhdistettynä huokoisen aineen heikkoon lämmönjohtumiseen johtaa materiaalin lämpötilan kohoamiseen ja lopulta aineen itsestään tapahtuvaan syttymiseen liekehtivään paloon saakka.

3.6.1.2.3 RÄJÄHDYSAINHEET

Epäiltäessä palon saaneen alkunsa räjähdysaineiden räjähtämisestä tapahtumapaikalla liikuttaessa on noudatettava erityistä varovaisuutta ja käytettävä suojavälineitä. On mahdollista, että paikalla on räjähtämätöntä räjähdysainetta, jota on epätäydellisen räjähdysvaikutuksesta sinkoutunut laajallekin ympäristöön. Paikalla voi olla myös suutareita, täysin räjähtämättömiä räjähteitä, esim. pommeja. Mikäli tapahtumapaikalta löydetään kokonaisia

pommeja, on syytä muistaa, että pommin lähemmän tutkimisen ja vaarattomaksi tekemisen saa suorittaa vain siihen koulutettu henkilö. Oppikirjassa esitellään joidenkin räjähdysaineiden ulkonäköä ja pakkausmateriaaleja. Räjähdyspaikan tutkinta kuuluu aina vaativan rikospaikkatutkinnan piiriin, jolloin apuna on käytettävä poliisin tai puolustusvoimien asiantuntijoita.

Räjähdysainejäämiä etsittäessä palopaikalta on löydettävä mahdollinen räjähdyskeskus eli "täyden tuhon alue", jonka merkinä on usein kraaterimainen kuoppa. Paikannetusta räjähdyskeskuksesta ja sen ympäristöstä otetaan ainesta noin 15 mm syvyydeltä. Kraatterin eli räjähdyspisteen suuruuden ja alustamateriaalin perusteella voidaan arvioida räjähdysaineen määrää. Näytteitä on otettava myös räjähdysaiheuttaman paineaallon suunnasta. Näytteiksi otetaan edellisen lisäksi räjähdysjälkeen eri pinnoille laskeutunutta pölyä, nallin sirpaleita, sytytyslangan ja sähköjohtimen kappaleita, räjähdysainepatruunoiden käärepapereita ym. Räjähdysjätettä otetaan 1 - 2 litraa tavallisesti palojätepussiin.

3.6.1.2.4 LASIT

Rikostapahtumiin liittyvät näytteeksi otettavat lasinsirut voivat olla mikroskooppisen pieniä. Näytteiden talteenotto vaatteista tapahtuu rikosteknisessä laboratoriossa tai rikostutkimuskeskuksissa. Silminnähtävät lasinsirut kerätään sellaisenaan muovisiin näyterasioihin. Tapahtumapaikalta otetaan jokaisesta rikotusta lasista vertailunäytteet. Näytteet otetaan ikkunapuitteissa kiinni olevasta lasista n. 30 x 30 mm:n kokoinen pala. Vertailulaseihin merkitään, miltä puolelta lasi on rikottu, ja pakataan erillisiin rasioihin. Paikalta voidaan myös poimia pudonneita irrallisia siruja. Näytteiden otossa on otettava huomioon niiden saastumisvaara.

3.6.1.2.5 MAALIT

Murtotapahtumissa tutkimuksen kohteena ovat hyvin usein mikroskooppisen pienet maalihiukkaset. Murtautujan käyttämien työkalujen, sorkkarautojen ja talttojen maaleja saattaa tarttua murrettujen ovien, ikkunoiden ja luukkujen murtokohtiin. Silminnähtävät sirut kerätään sellaisenaan näyterasioihin. Jos maalinäyte on kiinni kiinteässä alustassa, se irrotetaan esim. kirurgin veitsellä. Otettaessa näyte esim. oven pielestä irrotetaan myös hiukan puuta. Työkaluissa oleva maali irrotetaan vasta rikosteknisessä laboratoriossa. Koska kyseessä ovat erittäin pienet hiukkaset, on tärkeää, etteivät näyte ja vertailunäyte joudu kosketuksiin ja saastu säilytyksen ja kuljetuksen aikana.

3.6.1.2.6 KUIDUT JA KARVAT

Murtopaikoilta saattaa löytyä kangaspalasia, kuitukimppuja tai hiuksia. Osa etsittävästä kuiduista voi olla silmin näkymättömiä, vain 1 ... 5 mm mittaisia. Näytteiden pienen koon vuoksi on kuitunäytteiden käsittelyssä oltava erityisen varovainen. Saastumisvaaran vuoksi rikospaikalla ollut ei saa käsitellä rikoksesta epäillyn henkilön vaatteita ja varusteita. Silminhavaittavat karvat, kuitukimput, langat, kangaspalaset yms. kerätään atuloilla rasioihin tai paperitaitoksiin, jotka laitetaan muovipusseihin. Näkymättömät kuidut teipataan esineistä, iholta ja

vaatteista. Teipatusta kohteesta lähetetään myös vertailunäyte, joka otetaan nyppimällä tai leikkaamalla pieni pala kankaasta ottaen huomioon kohteen kaikki värit ja kuitutyypit. Hiuksista kuitunäyte ja hiusnäyte taltioidaan kuitukammalla kampaamalla.

3.6.1.2.7 VERITAH RAT

Mikäli tapahtumapaikalta löytyy veritahroja niistä voidaan tehdä DNA-tutkimuksia. Veritahranäytteet otetaan talteen alustoineen, esim. vaatteet ja tekovälineet. Mikäli alustaa ei voida irrottaa, tahra raaputetaan irti tai se leikataan esim. kankaasta. Tahra voidaan myös imeyttää vedellä kostutettuun vanupuikon kärkeen. Kankaasta imeytystä ei saa tehdä. Jos tahra on tuore ja lammikkomainen, se voidaan myös lusikoida näyteastiaan ja säilyttää jääkaapissa. Kosteet veritahrat kuivataan ja säilytetään huoneen lämmössä. Tahroja ei myöskään saa koskettaa paljain käsin saastumisen takia. Vertailunäytteeksi asianomaisista otetaan 2 ... 5 ml EDTA-verta (1 putki).

3.6.1.2.8 MUOTOJÄLJET

Palopaikalla tärkeitä tutkintaa suuntaavia havaintoja ovat mahdolliset murtautumiseen tai asiattomaan oleskeluun liittyvät jäljet. Koska jälkien vertailua ei voida suorittaa tapahtumapaikalla, ne on otettava talteen huolellisesti. Mikäli talteen ottaminen ei ole mahdollista, jäljet on ainakin pyrittävä suojaamaan.

Työkalujen, esim. sorkkaraudan, puukon, taltan ja putkipihtien, jättämät jäljet pyritään ottamaan talteen alustoineen, jos ne ovat irrotettavissa. Vaikeasti irrotettavista paikoista, esim. ovista, ovenkarmeista ja ikkunoista, jäljet otetaan talteen silikonimassalla.

Palopaikalta ja sen ympäriltä voidaan löytää myös mahdollisen syyttäjän jättämiä jalkineen jälkiä. Jälkien perusteella voidaan päätellä paikalla olleiden henkilöiden lukumäärä ja kulkureitti. Jalkineen jäljet voivat olla joko pehmeään materiaaliin syntyviä painumajälkiä tai pölyn ja lian aiheuttamia pintajälkiä, jotka voivat olla vaikeasti silmin havaittavissa. Tämän tyyppisiä jälkiä kiinteistä pinnoista etsittäessä pintaa voidaan valaista pinnan suuntaisesti voimakkaalla käsi- tai halogeenivalaisimella.

Ennen jälkien talteenottoa ne voidaan valokuvata. Mikäli jalkineen jäljet ovat irrallisilla alustoilla, esim. lasinkappaleilla ja paperilla, jäljet otetaan talteen sellaisenaan.

Kiinteältä alustalta pintajäljet voidaan taltioida myös foliolle. Painumajäljet otetaan talteen valamalla. Maassa olevat jäljet valetaan kipsillä ja lumessa olevat jäljet rikillä.

Myös ajoneuvon jättämistä jäljistä voidaan tehdä monia päätelmiä. Renkaiden jälkien perusteella voidaan arvioida ajoneuvon raideleveys edessä ja takana, akseliväli, renkaan kulutuspinnan leveys sekä kuviointi ja mahdollisesti myös renkaan merkki, malli ja koko. Jälkien perusteella on mahdollista tunnistaa myös

ajoneuvon merkki ja malli. Jäljet mitataan ja valokuvataan tarkasti. Myös ajoneuvon renkaan jäljet voidaan tallentaa valamalla kuten jalkineen jäljet.

3.6.2 Muut näytteet

Tässä luvussa esitetyt näytteenotto-ohjeet ovat Keskusrikospoliisin rikosteknisen laboratorion näytteenotto-ohjeita (tekniset palonsyytutkimukset).

Yleistä

Yleisimmät teknistä tutkintaa vaativat palonsyyt ovat vialliset sähkölaitteet, väärinkäytetyt sähkölaitteet, vialliset kaasulaitteistot, mekaaninen ylikuumeneminen, itsesyttyminen ja räjähdykset sekä niihin liittyvät palot.

Laboratoriotutkimuksia helpottaa ja tutkimustuloksen tarkkuutta lisää, jos näytteen lisäksi on saatavissa kohdetta esittäviä valokuvia, piirustuksia, kuulusteluja ja muita kirjallisia selvityksiä. Epäselvissä ja normaalitilanteesta poikkeavissa tapauksissa on suositeltavaa olla yhteydessä rikosteknisen laboratorion tutkijoihin jo ennen näytteiden ottoa. Joissakin tapauksissa laboratorio voi antaa esim. palon käyttäytymiseen liittyviä lausuntoja ilman näytteitä pelkkään kirjalliseen materiaaliin perustuen.

Sähköjohtimet

Epäiltäessä sähköjohtimeen tullutta oikosulkua, maasulkua tai irtokosketusta palon aiheuttajaksi, otetaan näytteeksi ne johtimet, joita perustellusti epäillään viallisiksi.

Jos johtimessa on havaittavissa oleva oikosulkupaikka, riittää yleensä noin metrin pituinen osa. Näytteessä on kuitenkin mahdollisuuksien mukaan hyvä olla myös eristeiltään palamatonta johtoa.

Sähköasennustarvikkeet

Vialliset pistorasiat, pistotulpat, sähkökytkimet, jakorasiat ym. tarvikkeet lähetetään purkamattomina kokonaisuuksina.

Kiinteästi asennetuista tarvikkeista voidaan tarvittaessa ottaa mukaan pala kiinnitysalustaa.

Sähkölämmittimet

Lämmityslaitteet lähetetään yleensä kokonaisina, mikäli ne eivät ole erikoisen suuria. Mukaan otetaan aina liitäntäjohto ellei se ole tuhoutunut palossa.

Sähkökiukaat toimitetaan yhdessä säätölaitteiden (irrallinen termostaatti tai vastaava) kanssa.

Jos lämmittimessä tai kiukaassa on kiinnipalanutta ainetta, kuten muovia tai tekstiilikuituja, pakkaaminen on tehtävä siten, että tämä aine ei pääse irtoamaan.

Sähköliedet

Palo alkaa lähes aina liesitasolta, hyvin harvoin uuniosasta. Yleensä riittää liesitason ja kytkinpaneelin irrottaminen näytteeksi. Keittolevyjen ja kytkimien välisiä johtoja ei saa näytettä otettaessa katkaista.

Liedellä mahdollisesti olleet astiat, levysuojat ja muu materiaali lähetetään tason mukana.

Sähkökeskukset

Palaneesta rakennuksesta voidaan joutua irrottamaan pääkeskus tai ryhmäkeskuksia, kun epäillään palon alkaneen siitä tai kun keskuksesta saatavaa tietoa halutaan käyttää palon syttymispaikan selvittämiseen.

Keskukset irrotetaan mahdollisimman yhtenäisinä niiden sisäistä johdotusta katkaisematta.

Keskuksissa olevien sulakkeiden tutkimisessa ei pelkkä silmämääräinen tutkinta riitä kuin poikkeustapauksissa.

Suurien sähkökeskusten tutkiminen on pyrittävä tekemään palopaikalla.

Sähkömoottorit

Suurien sähkömoottorien tutkimistavasta ja -paikasta on neuvoteltava etukäteen rikosteknisen laboratorion tutkijoiden kanssa.

Pienet moottorit voidaan toimittaa tutkittavaksi normaalikäytännön mukaisesti.

Kylmäkoneet

Jääkaapeista ja pakastimista riittää usein kompressorin ja siihen liittyvien sähkölaitteiden (termostaatti, sähkökytkimet ja sisävalo) lähettäminen. Kylmäkoneiden liitosjohdoista saattaa löytyä esim. hankautumisesta johtuvia oikosulkuja, joten johdot on hyvä lähettää näytteen mukana.

Kotitalouskoneet

Kodin pienkoneet, kuten mikroaaltouunit, kahvinkeitin, leivänpaahtimet, yleiskoneet, silitysraudat, tukankuivaajat, kihartimet, kuumailmapuhaltimet, televisiot ja äänentoistolaitteet lähetetään kokonaisina johtoineen.

Pesukoneiden ja kuivausrumpujen lähettämisestä kannattaa neuvotella laboratorion edustajan kanssa ennen toimittamista.

Valaisimet

Valaisimet otetaan niihin liittyvine johtoineen ja kytkimineen. Tarvittaessa mukaan voidaan ottaa pala kiinnitysalustaa, jos valaisimen ylikuumentumista epäillään.

Valaisinten irrotus ja pakkaaminen on tehtävä riittävän huolellisesti rikkoutumisen välttämiseksi.

Kaasulaitteet

Kaasuputkistojen ja kaasunkäyttölaitteiden irrotus on tehtävä varovasti liitosten löystymisen välttämiseksi.

Kaasupullosta riittää useimmiten pulloventtiilin irrotus näytteeksi.

Kaasua sisältävien kaasupullojen käsittelyssä ja kuljettamisessa on otettava huomioon turvallisuusmääräykset. Mahdollisesti vuotavat pullot on viisainta toimittaa laboratorioon esim. avonaisessa peräkärjessä.

Öljylämmityslaitteet

Palavia nesteitä sisältävien laitteiden kanssa on toimittava riittävän varovasti. Mahdollisuuksien mukaan näytteet on tuotava laboratorioon eikä postilähettyksenä.

Auto-, vene- ja työkonepalot

Otetaan yhteys vakuutusyhtiön insinööreihin tai rikosteknisen laboratorion tutkijoihin. Tutkimustapa harkitaan tapauskohtaisesti ja monesti tutkinta onnistuu parhaiten palopaikalla.

Mekaaniset syttymissyöt

Mekaaniset laitteistot kuten laakeristot, kiilahihnakäytöt ja voimansiirtolaitteet lähetetään joko rikostekniseen laboratorioon tutkittavaksi tai tutkitaan palopaikalla. Suurien näytteiden lähettämisestä on neuvoteltava etukäteen rikosteknisen laboratorion kanssa.

Ylikuumentuminen ym.

Savuhormeista ja ylikuumentuneista lämmityslaitteista aiheutuneet palot on useimmiten tutkittava palopaikalla.

Joissakin tapauksissa voidaan palon syttymistä koskeva lausunto antaa asiakirjamateriaalin ja valokuvien perusteella.

Muut palonsyyt

Näytteenotto harkitaan tapauskohtaisesti.

Noudatetaan näitä ohjeita soveltuvin osin.

Näytteiden kuljettaminen

Pienet näytteet lähetetään parhaiten postipakettina tai tuodaan suoraan laboratorioon.

Suuremmat näytteet voidaan lähettää rahtikuljetuksina tai näytteen lähettäjä toimittaa ne itse perille.

Kaikkein suurimmat tavarat voidaan tuoda kuorma-autolla laboratorioon. Laboratorion käytettävissä on trucki kuorman purkamiseen. Kuljetuksesta tiedotetaan laboratorioon etukäteen.

3.7 SILMINNÄKIJÖIDEN JA MUIDEN HENKILÖIDEN HAASTATTELU

Palon syytymiskohdan arvioinnin kannalta on tärkeää päästä mahdollisimman nopeasti puhuttelemaan palon ensimmäisinä huomanneita henkilöitä heidän tekemistään havainnoista itse palosta ja palopaikan ympäristöstä. Puhuttelussa on pyrittävä selvittämään:

- tarkka aika, jolloin ensimmäinen havainto palosta tehtiin
- missä havainnon tekijä palokohteeseen nähden tällöin oli
- missä rakennuksen kohdassa palo ilmeni ensimmäisenä
- savun ja liekkien määrä ja väri
- mitkä kohdat rakennuksesta olivat vielä palamatta
- missä järjestyksessä ikkunat rikkoutuivat tai tuli läpäisi rakenteita
- miten palo kehittyi tästä eteenpäin
- tuuli- ja muut palon syttymiseen ja leviämiseen vaikuttaneet sääolosuhteet
- oliko paikalla muita ensihavaintoja tehneitä henkilöitä tai sellaisia henkilöitä, joilla saattaisi olla osuutta palon syttymiseen.

Tärkeä tietolähde syttymispaikan ja -syy arvioinnin kannalta ovat ne palokunnan sammutusmiehet, jotka ensimmäisinä tunkeutuvat palokohteeseen. He pystyvät useinkin kertomaan palokohteen ovien, ikkunoiden ja luukkujen asennot, palon todennäköisen syttymisalueen ja leviämistavat ja -suunnat.

Palopaikalla ensimmäiset todistajien haastattelut tekee yleensä se poliisipartio, joka on lähetetty kohteeseen pelastustoimiin tai suojaamaan palokunnan työskentelyä. Näiden tietojen perusteella voidaan pelastus- ja sammutustoimia

ohjata oikeaan suuntaan. Tietoja voidaan tietysti käyttää myös arvioitaessa sitä, liittyykö palon syttymissyyn rikos tai joku muu sellainen tapahtuma, joka velvoittaa poliisin käynnistämään joko esitutinnan tai poliisitutinnan.

Ennen syttymispaikan tutkintaa on tiloissa asuvien tai työskennelleiden puhutteluissa selvitettävä mm. seuraavat seikat:

- tilan kalustus ja siellä säilytetty omaisuus
- keillä henkilöistä on luvallinen pääsy tiloihin
- sähkö-, lämmitys- ja työkoneiden sekä muiden lämpöä aiheuttavien laitteiden sijainti palokohteessa
- jäivätkö ko. laitteet jännitteellisiksi viimeisen käytön jälkeen
- miten ko. laitteet ovat toimineet viime aikoina
- milloin niitä on korjattu tai huollettu viimeksi ja missä
- mitä työtä tilassa on viimeksi tehty
- kuka poistui tilasta viimeisenä ennen paloa.
- miten poistuttaessa lukitukset järjestettiin ja hälytyslaitteet kytkettiin.

Edellä mainituilla tiedoilla on suuri merkitys suunniteltaessa syttymäpaikan tutkintajärjestystä ja -taktiikkaa. Sellainen henkilö, joka tuntee hyvin syttymäpaikalla ennen paloa vallinneet olosuhteet, voidaan myös pyytää paikkatutkintaan mukaan ainakin tutinnan alkuvaiheen ajaksi.

4. SYTTYMISKOHDAN TUTKIMINEN

Sana "syttymiskohta" tarkoittaa tässä yhteydessä paikkaa, jossa palo syttyi ensimmäisen kerran eli paikkaa, josta palo sai alkunsa. Palon levitessä ympäristö syttyy tuleen eri kohdista. Palo ei aina leviä tasaisesti alkuperäisestä syttymiskohdasta ja voi löytyä useita syttymiskohtia, jotka erehdyttävästi näyttävät alkuperäiseltä syttymiskohdalta. Esimerkkinä tästä esitetään oppikirjan toisen osan luvussa 4 "Sähkövian aiheuttama huoneistopalo".

Jokainen tulipalo on yksilöllinen ja eroaa toisista tulipaloista mm. seuraavilta tekijöiltä: palopaikan rakenne, palokuorma, syttymiseen liittyvät tekijät, ilmansaanti, ilmavirtaukset, palon havaitsemisen ajankohta ja sammutustyön vaikutukset. Täysin kattavaa ohjetta ei ole mahdollista antaa. Tulipalo luonnontieteellisenä ilmiönä käyttäytyy kuitenkin yleisellä tasolla ennustettavasti. Näin ollen on yleensä mahdollista tunnistaa jälkiä, jotka kertovat palon etenemissuunnasta, kestosta ja leviämismekanismeista. Jälkien tunnistaminen ja niiden tulkinta edellyttää tietämystä palamisen kemiasta ja fysiikasta (luku 2).

Jos palo on kestänyt niin kauan, että koko tai huomattava osa kohteesta on palanut, syttymiskohdan arviointi ei ole helppoa. Usein voidaan kuitenkin rajata suurempi alue, josta palo on todennäköisesti alkanut, ja kohdistaa yksityiskohtaisemmat tutkimukset tähän. Silloinkin kun ei voida osoittaa selvää syttymissyötä tai tarkkaa syttymiskohtaa, todennäköisen syttymisalueen rajaaminen saattaa olla arvokas tieto. Ajatellaanpa esimerkiksi tehdaspaloo, jossa samassa isossa palaneessa tilassa on erilaisia laitteita, jotka kaikki viottuessaan voisivat periaatteessa sytyttää tulipalon. Jos pystyttäisiin rajaamaan todennäköinen syttymisalue siten, että siinä olisi ainoastaan yksi laite, niin tiedosta voisi olla hyötyä suunnitellessa tehtaan paloturvallisuuden parantamistoimia.

4.1 PALOJÄLJET

Palojäljet ovat tulipalon näkyvät tai mitattavat seuraukset. Tällaisia ovat hiiltyminen, hapettuminen, palavien aineiden häviäminen, savu- ja nokijäljet, vääntymät, sulaminen, värimuutokset, materiaaliominaisuuksien muutokset, rakenteiden sortuminen ym. Rajaviivat tai raja-alueet erottavat palojäljet ympäristöstään, joka voi olla kokonaan vaurioitumaton tai vähemmän vaurioitunut kuin palojälki. Palojälkien muodostumiseen vaikuttaa moni tekijä, kuten materiaalin ominaisuudet, paloteho, ilmanvaihto-olosuhteet, sammutustoimenpiteet ja materiaalin palollealtistumisaika. Esimerkiksi materiaalissa, joka on pitkään ollut matalammassa lämpötilassa, saattaa olla samanlaiset palojäljet kuin materiaalissa, joka on ollut korkeammassa lämpötilassa lyhyemmän ajan. Tällaiset näkökohdat on otettava huomioon palojälkiä tarkasteltaessa.

Palojäljen muoto ja laatu riippuvat pintamateriaalista, johon jälki muodostuu, ja tämän laadusta. Jos saman materiaalin sileälle ja rosoiselle pinnalle kohdistetaan sama lämpövirta, niin rosainen pinta vaurioituu enemmän. Tämä johtuu toisaalta kaasuvirtauksen lisääntyneestä pyörteisyydestä rosaisen pinnan läheisyydessä,

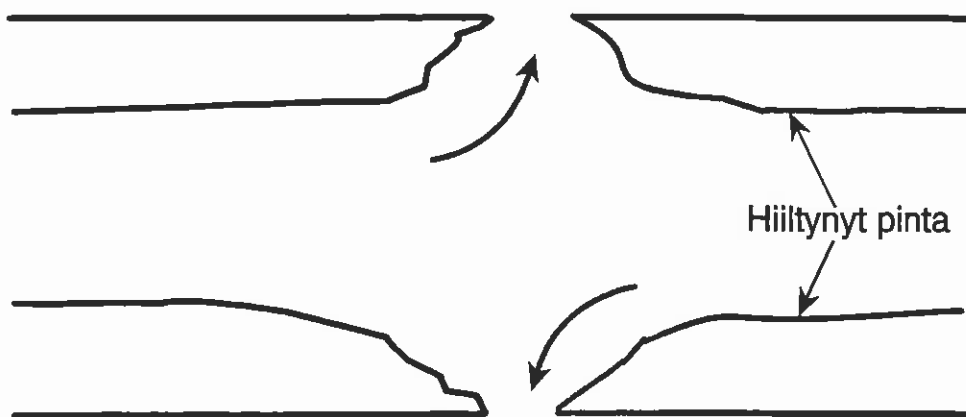
toisaalta kasvaneesta pinnan ja massan suhteesta. Erilaiset pinnan päällysteet kuten maali, tapetti, muovi ym. vaikuttavat myös palamisjälkiin (vertaa kohta 4.3).

Palavat pinnat saattavat olla tummuneet pyrolyysin alkuvaiheen vaikutuksesta, palaneet tai olla hiiltymisen eri kehitysvaiheissa. Palamattomissa pinnoissa, kuten metalleissa tai eri mineraalituotteissa, saattaa olla värimuutoksia, hapettumista, vääristymiä tai sulaneita kohtia.

4.1.1 Vaakasuorien tasojen läpäisy

Vaakasuoran tason läpäisy tapahtuu useimmiten alhaalta ylöspäin, koska lämpö siirtyy tavallisesti ylöspäin nosteen vaikutuksesta. Lieskahtaneessa huonetilassa kuumat kaasut saattavat kuitenkin purkautua lattiassa jo olevista pienistä raoista, ja saavat siten aikaan aukon. Intensiivinen palaminen huonekalujen alla, kuten polyuretaanitäytteisten patjojen tai tuolien alle muovin sulaessa syntyvä palava nestelammikko lattialla, tai kyteminen sortuneiden kattorakenteiden alla saattavat myös aiheuttaa läpäisyä. On myös huomattava, että sammutustöiden yhteydessä tehdään usein reikiä kattoihin ja lattioihin savutuuletuksen, sammutuksen ja tarkistuksen vuoksi, eivätkä nämä aukot liity varsinaisiin palojälkiin.

Aukon palamisen suunta voidaan joskus määrittää aukon reunojen kaltevuudesta. Jos reuna on leveämpi ylhäältä ja kalteva alaspäin kohti reikää, niin palon suunta on ollut ylhäältä alas, ja päinvastoin (kuva 4.1). Toinen mahdollisuus selvittää asia on tarkastella vaurioiden laajuutta tason ala- ja yläpuolella. Jos palo on liikkunut alhaalta ylöspäin, niin alapuolella olevan pinnan vauriot ovat suuremmat kuin yläpuolella olevan pinnan vauriot. Päinvastainen tapaus viittaisi taas palon kulkemiseen ylhäältä alaspäin.



Kuva 4.1. Vaakasuoran tason palamisjäljet, kun palo on edennyt ylhäältä alas ja päinvastoin. Nuolet osoittavat palon etenemissuunnan.

Jos havaitaan, että palo on kulkenut ylhäältä alaspäin, esimerkiksi lattian tai pöydän läpi, niin siihen tulisi kiinnittää erityistä huomiota kuten yleensä muihinkin poikkeamiin. Lisäksi tulee pitää mielessä, että palamisen suunta on

saattanut olla ylös- tai alaspäin tulipalon eri vaiheissa. Silloin ainoastaan viimeisin palon suunta saattaa olla palojäljistä näkyvissä.

4.1.2 Puun kulumisen palamisen aikana

Puun tai muun palavan jähmeän materiaalin palaessa ainetta höyrystyy, mikä muuttaa kappaleen muotoa. Jäljelle jäävän materiaalin muoto ja määrä voivat sellaisenaan muodostaa rajaviivoja, jotka antavat tietoa palon etenemissuunnasta. Puuta on yleensä kulunut enemmän ja hiiltyminen on syvempää lämmönlähteenpuoleisella pinnalla (ks. myös kohta 4.2.2, kuva 4.13).

4.1.3 Hiiltyminen

Monen materiaalin pinta hiiltyy tai muuttaa väriään palossa. Hiiltymisen ja värinmuutoksen laajuutta voidaan verrata lähellä oleviin alueisiin palon voimakkuuden ja leviämisen arvioimiseksi. Hiiltyviä materiaaleja ovat mm. puu, eräät muovit, maalit ja paperit. Useimmiten tulee esille puun hiiltymisen arviointi, jota käsitellään seuraavasti yksityiskohtaisesti.

Hiiltymisnopeus

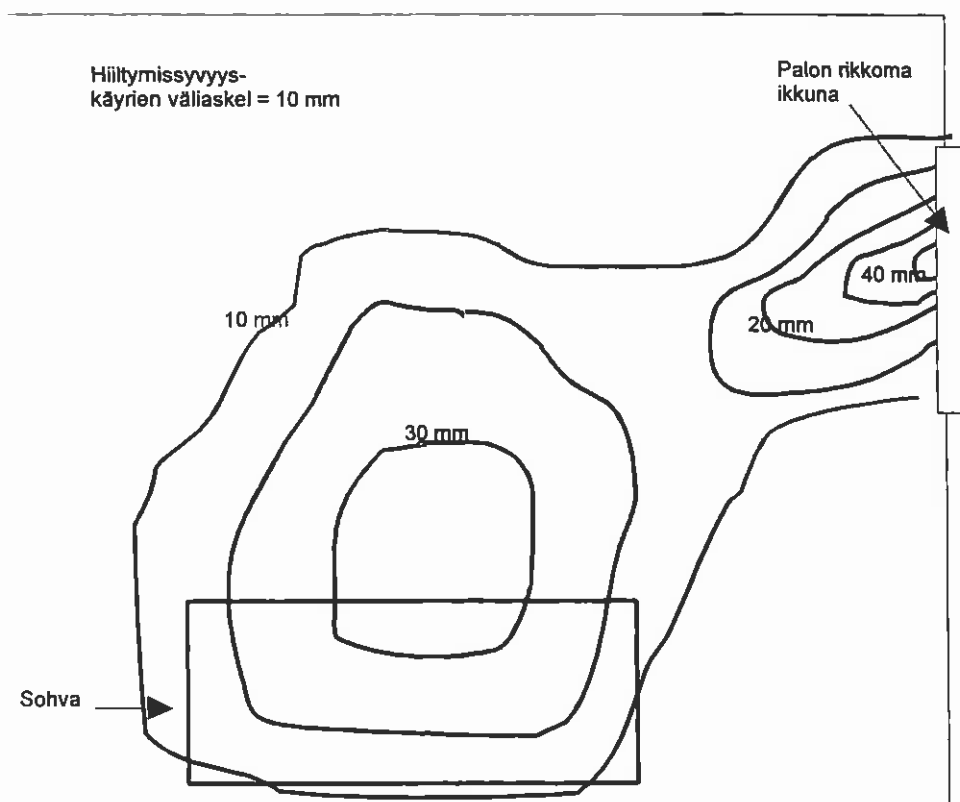
Hiiltymissyvyys riippuu useasta tekijästä, mm. puuhun kohdistuvasta lämpövirrantiheydestä, puun tiheydestä, puun kosteudesta ja ilmanvaihtolosuhteista tulipalon aikana. Hiiltymisnopeus voi vaihdella huomattavasti, eikä sitä voida suoraan päätellä hiiltymissyvyydestä. Laboratorio-olosuhteissa, joissa lämpörasitus on kohdistunut näytteen toiselle puolelle, on mitattu hiiltymisnopeuksia alkaen 2 $\mu\text{m/s}$ lämpötilassa 390 °C päättyen 70 $\mu\text{m/s}$ lämpötilassa 1090 °C (NFPA 921, 1995). Mikkola on kerännyt ja mitannut erilaisten Suomessa käytettyjen rakennusmateriaalien hiiltymisnopeuksia tulipalotilanteen hyvin kattavalla alueella (Mikkola 1990). Oppikirjan toisen osan taulukossa 1.3 on lueteltu muutamia tärkeimpien aineiden hiiltymisnopeuksia. Puun ikä ei vaikuta hiiltymisnopeuteen edellyttäen, että puu on kuivunut, koska sen jälkeen kosteuspitoisuus määräytyy ympäristön kosteuden ja lämpötilan mukaan.

Hiiltymissyvyyksien tarkastelun suurin hyöty on palon leviämisen arvioinnissa. Mittaamalla hiiltymisen suhteellinen syvyys ja laajuus voidaan arvioida, mitkä osat ovat olleet kauimmin kuumassa. Pisteittäinen hiiltymissyvyyden kartoitus antaa käsityksen vaurioiden jakautumisesta palopaikalla ja suurimpien vaurioiden paikasta, jotka ovat voineet johtua suorasta altistuksesta, ilmanvaihdosta tai palokuorman sijoituksesta. Näistä tiedoista voidaan sitten päätellä palon leviämisen suunta siten, että hiiltymissyvyys pienenee kauempana lämmönlähteestä.

Palojälkiä, joita ei suoraan silmämääräisesti havaita, voidaan usein saada esiin mittaamalla hiiltymissyvyksiä ja merkitsemällä nämä arvot palotilaa esittävään piirroksen. Yhdistämällä samaa hiiltymissyvyyttä vastaavat pisteet saadaan nämä palojäljet näkyviin (kuva 4.2).

Hiiltemissyvvyysien tarkastelussa otetaan huomioon seuraavat seikat:

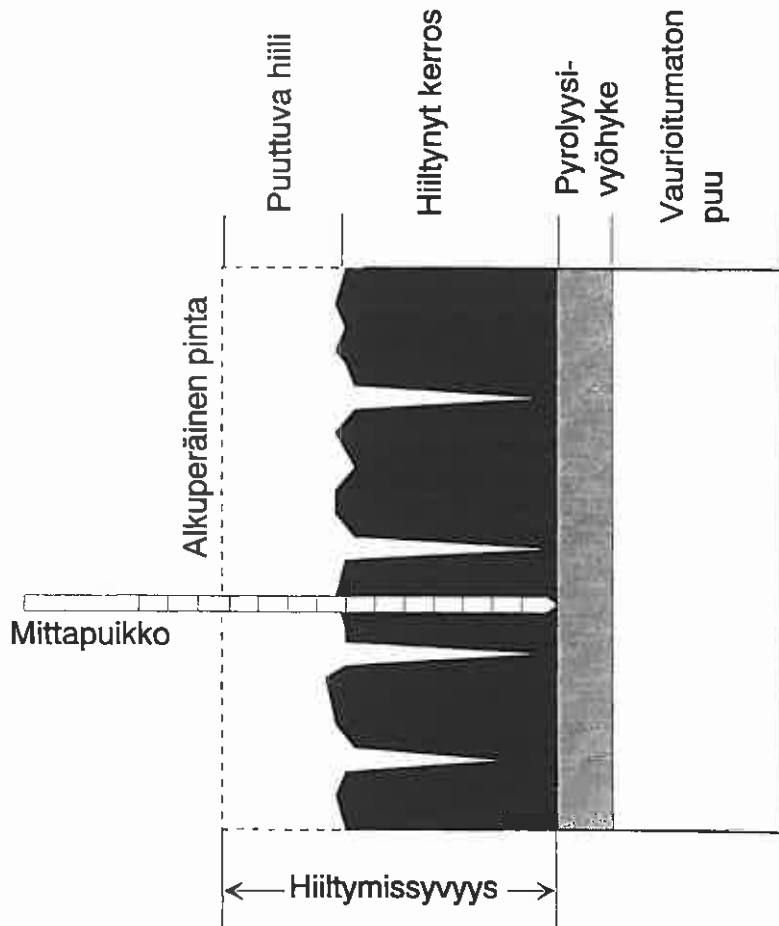
- a) Onko kyseessä yksi tai useampi lämmönlähde joka on aiheuttanut hiiltemisen? Hiiltemissyvvyyskartta saattaa paljastaa useamman syytymiskohdan.
- b) Ainoastaan samanlaisten materiaalien hiiltemissyvvydet ovat vertailukelpoisia keskenään.
- c) Ilmanvaihto-olosuhteiden vaikutus palamisnopeuteen. Puu hiiltemy nopeammin paikoissa, joissa ulkoinen ilmavirta pyyhkii suoraan pintaa (vrt. ahjo).
- d) Hiiltemissyvvyysmittaukset tehdään aina samalla menetelmällä ja välineellä.



Kuva 4.2. Hiiltemissyvvyyskäyrien esittäminen 10 mm:n syvyydsväleihin NFPA 921 (1995) mukaan.

Teräväkärkiset instrumentit kuten linkkuveitsi eivät ole sopivia tarkkaa mittausta varten, koska veitsen terävä kärki työntyy helposti palamattomaan puuhun. Ohuet, tylppäkärkiset puikot sopivat paremmin. Mittaukset tehdään samalla välineellä ja samalla voimalla, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia. Hiiltemissyvvyys mitataan kokonaisen hiiltemyneen pinnan keskeltä eikä hiiltemässä olevista halkeamista (kuva 4.3). Mittauksissa otetaan huomioon puun pinnalta mahdollisesti kokonaan palanut puuttuva kerros. Kun tämä puuttuva kerros

lisätään hiiltemissyvyyden mittaustulokseen niin saadaan kokonaishiiltemissyvyys (kuva 4.3).



Kuva 4.3. Hiiltemissyvyyden määrittäminen NFPA 921 (1995) mukaan.

Huomautuksia hiiltemisjäljistä

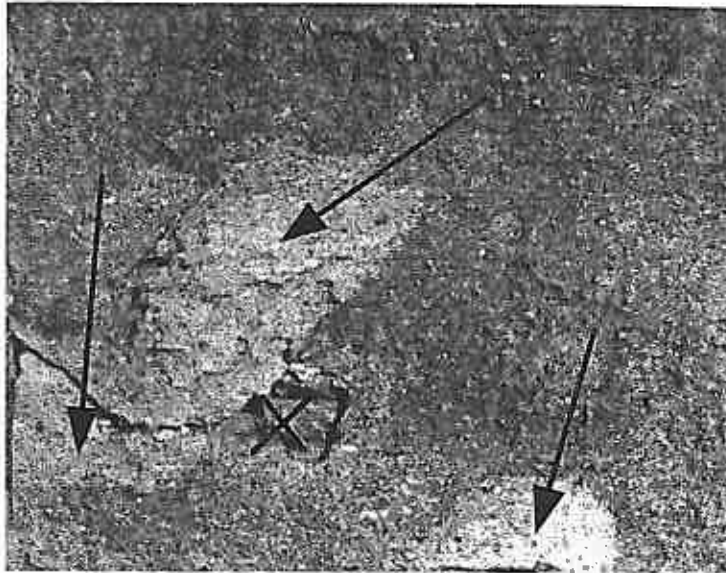
Hiiltemisen ulkonäöstä ja halkeamista on toisinaan esitetty väitteitä, joilla ei ole tieteellisesti todennettuja perusteluja. Suurten, kiiltävien hiiltemien (“alligaattori-hiiltemä”) on väitetty viittaavan palavien nesteiden käyttöön paloa kiihdyttävänä aineena. Tällaisia hiiltemiä saattaa kuitenkin esiintyä monissa erilaisissa tulipaloissa, eikä ole olemassa perusteluja tälle väitteelle. On myös esitetty väitteitä, että hiiltemän pinnan himmeys, kiiltävyys tai väri antaisi tietoa mahdollisen nestemäisen hiilivedyn käytöstä. Tällekin väittämälle ei ole tieteellisiä perusteluja, eikä pelkästään hiiltemän ulkomuodosta voida päätellä palavien nesteiden käytöstä (NFPA 921, 1995).

Kuten edellä todettiin, hiiltymisnopeus riippuu monesta seikasta eikä pelkästään hiiltymissyvyyden perusteella voida päätellä palon kestoja. Kuitenkin vertailemalla hiiltymissyvyyksiä ja laskemalla niistä suhteellisia kestoajoja, palon kulusta voidaan saada melko hyvä kuva. Erityisen selkeä kuva muodostuu paljon massiivista, samaa puuta sisältävistä tiloista, jotka eivät ole ehtineet palaa kovin pitkälle.

4.1.4 Kappaleiden murtuminen

Betonin, tiilen tai muurauksen murtuminen korkeassa lämpötilassa voi johtua useasta erilaisesta ilmiöstä, joita ovat (1) lohkeilu, (2) lämpösokki ja (3) koko kappaleeseen aiheutuvat lämpöjännitykset. Kaikissa tapauksissa kappaleeseen syntyy ulkoisen kuormituksen aiheuttamien jännitysten ja kappaleessa jo olevien jäännösjännitysten lisäksi lämpöjännityksiä. Niiden teoriasta on lyhyt yleisesitys Parkusin kirjassa (1976).

Lohkeilussa (1) huokoisessa aineessa olevan veden höyrynpaine kasvaa niin suureksi, että se saattaa räjäyttää pinnasta parinkymmenen millimetrin kerroksen ainetta irti kerrallaan paloaltistuksen jatkuessa, jos materiaali on niin tiivistä, että höyryn nopea ulosvirtaus estyy. Pinnan epätasainen kuumeneminen syvyysuunnassa synnyttää pinnan lähelle jännityskentän, **lämpösokin** (2), joka leikkaa pinnasta ohuita kerroksia kerta toisensa jälkeen palon kestäessä. **Kappaleen epätasainen lämpeäminen** (3) aiheuttaa koko kappaleeseen lämpöjännityksiä, jolloin hauraan aineen pintaan syntyy halkeamia. Säröt alkavat aina mikroskooppisen pienistä aihioista ja kasvavat halkeamiksi kuormituksen jatkuessa, kunnes koko kappale voi murtua. Siksi huonosti viimeistellyt pinnat saattavat aiheuttaa koko kappaleen helpomman murtumisen. Lämpöjännitysten aiheuttamia kappaleiden murtumisjälkiä ovat selvät halkeamat (3), pintaan muodostuneet kuopat (2) ja materiaalin häviäminen pinnasta lohkeilun seurauksena (1) (kuva 4.4). Betonirakenteiden murtumisesta ja lohkeilusta erilaisten mekaanisten ja lämpökuormitusten alaisena on laaja kuvasarja ja lyhyt esittely tärkeimmistä vaikuttavista prosesseista Kordinan ja Meyer-Ottensin kirjassa (1981 s. 152 - 167.). Murtunut alue saattaa näyttää vaaleammalta kuin sen usein nokisempi ympäristö, koska puhdas aine on paljastunut pinnan alta.



Kuva 4.4. Lohkeilua ruiskubetoninäytteessä polttokokeen jälkeen (nuolet). Vaaleanruskea mineraalivillapala (X) näytteen pinnalla suojaa kiinnityspulttia (Mangs ja Keski-Rahkonen 1993).

Lohkeilun esiintyminen on aikaisemmin yhdistetty palavien nesteiden aiheuttamiin epätavallisen korkeisiin lämpötiloihin. Asiasta ei ole kuitenkaan tieteellisiä todisteita. Päinvastoin on tehty kokeita, joissa toisaalta bensiiniä on poltettu betonilaatalla ilman lohkeilua ja toisaalta tavanomaiset rakennusmateriaalit betonilaatalla ovat aiheuttaneet huomattavaa lohkeilua sekä tummuneita alueita lohkeilleen alueen reunoilla (Smith 1991). Koska lohkeilu voi johtua monesta syystä, havainto lohkeilusta yksinään ei riitä osoitukseksi nestemäisen kiihdyttimen olemassaolosta. Pinnan kyky absorboida mahdollinen palava neste voi myös vaikuttaa lohkeilun esiintymiseen, esimerkiksi maalatun betonilattian lohkeilu on epätodennäköistä. Tarkasteltaessa lohkeiltuja kohtia, pinnan tila ennen paloa on selvitettävä.

Toinen tekijä, joka saattaa johtaa murtumiseen, on materiaalin kuormituksesta aiheutuvat jännitykset palon aikana. Lämpötilan noustessa lujuus heikkenee ja voi johtaa murtumiseen. Koska nämä kuormitetut alueet eivät välttämättä liity palotapahtumiin, murtumia saattaa esiintyä kattojen tai palkkien alla, vaikka kohta ei olisikaan suoraan syttymiskohdan yläpuolella. Näistä murtumista on havainnollisia kuvia Kordinan ja Meyer-Ottensin kirjassa (1981 s. 152 - 167.).

Kuuman materiaalin nopea jäädyttäminen esim. vedellä sammutustyön yhteydessä voi myös aiheuttaa lämpösokin ja irrottaa pinnasta suomu- tai levymäisiä kappaleita.

Yleensäkin murtumien merkitys palonsyyn selvittämisessä on lämmönlähteiden kartoituksessa ja analysoinnissa.

4.1.5 Hapettuminen

Hapettuminen on palamiseen liittyvä kemiallinen perusreaktio. Myös palamattomat materiaalit saattavat tuottaa palojälkiä, joista on hyötyä palonsyyn selvityksissä. Korkeissa lämpötiloissa happi yhtyy mm. metalleihin sekä kivi- ja maa-ainekseen sekä aiheuttaa väri- ja muodonmuutoksia.

Mitä korkeampi on lämpötila ja mitä pitempi on altistusaika, sitä huomattavammat ovat hapettumisen aiheuttamat muutokset.

Galvanoitu teräs saa himmeän vaalean pinnan jo lievässä lämmityksessä sinkkipinnoitteen hapettuessa. Riittävän voimakkaana tämä poistaa myös sinkityksen antaman suojan, ja teräs ruostuu sen jälkeen kastuessaan. Galvanoidussa teräksessä saattaa siten olla ruosteinen palonjälki, joka eroaa ympäröivästä teräksestä.

Suojaamattoman raudan tai teräksen pinta muuttuu hapettuessaan tulipalossa himmeän siniharmaaksi. Hapettumisessa syntyy paksuja oksidikerroksia, jotka saattavat hilseillä pois. Jos metalli on kastunut, tavanomaista ruosteenväristä oksidia voi esiintyä palon jälkeen.

Ruostumattoman teräksen pinta voi saada värikuvioita lievästi kuumentuessaan ja korkea lämpötila aiheuttaa himmeänharmaan värin.

Kuparin pinnalle muodostuu kuumennettaessa tummanpunainen tai musta oksidikalvo, jolla on rajaviivat. Hapettuneen alueen paksuus voi osoittaa, missä palo on ollut voimakkaampi, sillä mitä korkeampi pinnan lämpötila on ollut, sitä voimakkaampaa on hapettuminen.

Kivi- ja maa-aines saattaa muuttaa väriään hyvin korkeissa lämpötiloissa; värit vaihtelevat kellertävästä punaiseen.

Noki ja hiiltymät hapettuvat myös. Esimerkiksi kipsilevyn kartonkipinnan tumma hiiltymä, nokikerrostumat ja maali voivat hapettua jatkuvassa lämpöaltistuksessa. Hiili palaa heterogeenisellä reaktiolla, jossa happi yhtyy suoraan hiilen pintaan muodostaen pääosin hiilidioksidia, mikäli lämpötila on alle 500 °C (kuva 2.5), mutta pääosin hiilimonoksidia tätä korkeammissa lämpötiloissa (Williams 1985). Nämä ovat kaasuja ja poistuvat pinnalta. Tästä seuraa puhtaaksipalaminen, josta enemmän noen yhteydessä kohdassa 4.1.8.

4.1.6 Materiaalien sulaminen

4.1.6.1 YLEISTÄ

Puhtaat alkuaineet, kemialliset yhdisteet ja monet mineraalit sulavat määrättyissä lämpötiloissa, jotka tunnetaan hyvin tarkkaan. Metalliseokset ja kemiallisten yhdisteiden seokset sulavat tietyllä lämpötila-alueella, joka myös tunnetaan hyvin kirjallisuudesta. Lasit ja monet muovit, jotka jäähmeydestään huolimatta eivät ole varsinaisesti jähmeitä vaan amorfisia aineita, oikeastaan alijäähdyneitä nesteitä,

pehmenevät vähitellen lämpötilan noustessa ja lopuksi sulavat. Käytännöllisesti katsoen kaikki aineet menettävät lujuuttaan sulamismekanismista huolimatta lämpötilan kohotessa ja voivat muuttua muotoaan huomattavastikin, vaikka varsinaista sulamista ei olisi tapahtunutkaan. Sulaneen ja sulamattoman aineen välille voi muodostua rajaviivoja, jotka muodostavat palojälkiä. Eri aineiden pehmenemis- ja sulamislämpötilat kattavat koko lämpötila-alueen parista sadasta pakkasasteesta useaan tuhanteen lämpöasteeseen.

Sula metalli palojäännöksissä osoittaa, että siinä ympäristössä lämpötila on ollut metallin sulamislämpötilaa korkeampi. Oppikirjan toisen osan taulukossa 1.4 on metallien ja muutamien muiden aineiden sulamislämpötiloja ja -alueita. VDI Wärmeatlas (1984) sisältää suuren joukon puhtaiden kemiallisten aineiden sulamislämpötiloja. CRC Handbook of Chemistry and Physics, joka päivitetään vuosittain, sisältää laajimmat helposti saatavat taulukot erilaisten aineiden sulamislämpötiloista. Metalliseosten lämpötiloja ja tasapainopiirroksia on esitetty laajasti teoksessa ASM Handbook (1992).

Kestomuovit sulavat melko matalissa lämpötiloissa (noin 90 - 400 °C) (Billmeyer 1984) ja saattavat tuhoutua kokonaan tulipalossa. Siten muovien sulaminen saattaa antaa tietoa lämpötiloista, mutta pääasiassa kohdista, joissa muovin lähiympäristössä on ollut kuumia kaasuja mutta vähän tai ei ollenkaan liekkejä.

Jos sulaneen aineen likimääräinen sulamislämpötila on tiedossa, voidaan arvioida, missä lämpötilassa aine on ollut. Tästä voi olla hyötyä, kun arvioidaan lämpenemisen voimakkuutta ja kestoja, lämmön siirtoa tai palokuorman suhteellisia palotehoja. Kappaleen lämpötila riippuu siitä, kuinka paljon sitä lämmitetään, ja tämä taas mm. kuumien kaasujen lämpötilasta ja virtauksista, kappaleen sijainnista ja mitoista sekä palotehosta.

Hiilivetyjen (muovit ja palavat nesteet) sekä selluloosapohjaisten aineiden palaessa liekin lämpötila on likimain sama, noin 900 °C (Drysdale 1985 s. 134), vaikka niiden paloteho olisi huomattavasti erilainen. Palavat metallit ja hyvin eksotermiset kemialliset reaktiot voivat aiheuttaa huomattavasti korkeampia lämpötiloja kuin hiilivety- tai selluloosapohjaiset polttoaineet. Näistä tunnetuin lienee termiittireaktio: $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} = \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{Fe}$; $\Delta H = 835,3 \text{ kJ}$. Tässä reaktiossa kuuma alumiini hapettuu sieppaamalla rautaoksidista hapen. Lämpöä vapautuu niin paljon, että rauta sulaa helposti, mitä ei normaalissa hiilivetyjen liekissä tapahtuisi (Ullmann 1953). Menetelmää käytetään yleisesti esimerkiksi ratakiskojen hitsauksessa.

Lämpötilat rakennusten tulipaloissa ovat harvoin pitkiä aikoja yli 1050 °C. Kun polttoaineena on palavia nesteitä, lämpötilat voivat olla paljon korkeampia. Jos lisäksi tilaan syntyy voimakasta vetoa, lämpötila kohoaa edelleen.

Joidenkin aineiden, kuten lasien ja muovien, sulamislämpötiloja ei löydy suoraan kirjallisuudesta, koska ne riippuvat aineen tarkasta kemiallisesta koostumuksesta ja rakenteesta, jotka taas voivat vaihdella huomattavasti. Mikäli halutaan käyttää tällaista tietoa, on otettava näyte ja määritettävä sulamislämpötila sekä mahdolliset muut ominaisuudet pätevässä laboratoriossa.

4.1.6.2 METALLIEN SEOSTUMINEN

Jotkut metallit saattavat sulaa puhtaan metallin sulamislämpötilaa alemmissa lämpötiloissa seostumisen seurauksena. Jos kaksi metallia voi muodostaa seoksen, niin seoksen sulamislämpötila on matalampi kuin korkeammassa lämpötilassa sulavan puhtaan komponentin ja saattaa olla matalampi kuin kummankaan puhtaan komponentin sulamislämpötila (Sulonen 1981, Miekko-oja 1965 s. 135 - 137). Asiaa käsitellään myös kohdassa 5.3.2.7 sähköisten palonsyiden yhteydessä. ASM Handbook (1992) sisältää laajan kokoelman metalliseosten tasapainopiirroksia, joista sulamislämpötiloja on helppo lukea.

On siis mahdollista, että metalli, jolla on suhteellisen alhainen sulamislämpötila, seostuu metalliin, joka harvemmin sulaa paloissa. Näin voi käydä, jos alhaisemman sulamislämpötilan metalli tippuu toisen metallin päälle tai jos metallit ovat jo valmiiksi kosketuksissa toisiinsa ennen lämpötilan kohoamista.

Tällaisia alhaisen sulamislämpötilan metalleja ovat esimerkiksi alumiini, sinkki sekä lyijy. Metalleja, joihin nämä voivat seostua, ovat esimerkiksi kupari ja rauta (teräs). Kuperiseosten esiintyminen on melko tavallista, mutta raudan (teräksen) sekoittuminen tapahtuu vain joissakin voimakkaissa tulipaloissa.

Kupariset sähköjohdot ja vesijohto- ym. putket seostuvat usein tulipaloissa. Alumiinin kanssa muodostuu usein seos, jonka alumiinipitoisuus on yli 10 %; seos on hauras ja hopeanvärinen. Kuparijohto, johon on seostunut alumiinia, on hyvin hauras seoksen kohdalla ja katkeaa helposti taivuteltaessa.

Sinkin ja kuparin seos on kellertävä messinki, joka kuitenkin esiintyy melko harvoin palonsyötutkimuksissa, koska sinkkiä ei käytetä kovinkaan paljon rakennuksissa.

Tulipaloissa terässeoksia ei muodostu helposti. Jos alumiinia tai sinkkiä kuumennetaan kauan teräksen kanssa, siihen saattaa muodostua kuoppia tai reikiä seostumisen takia (vrt. termiittireaktio edellä).

Jos palojäännökset, jotka sisältävät kupariin seostunutta alumiinia, joutuvat säälle alttiiksi, seos saattaa syöpyä pois jättäen siistit reiät kupariputkeen tai tylpät päät kuparijohtimiin. Näin muodostuneet reunat eivät vaikuta sulaneilta. Tämä syöpyminen on sähkökemiallisen korroosion seurausta, jossa epäjalompi metalliseos liukenee veteen metallien välille syntyvän sähköjännitteen (Cu - Al yhdistelmällä n. 2 V) aiheuttaman elektrolyysin vuoksi (Miekko-oja 1965, s. 532 - 542, Shreir ym. 1994).

Seostuminen on todennettavissa metallurgisella analyysillä ja seos on tunnistettavissa. Jos korkean sulamislämpötilan metallit sulavat seostumisen takia, se ei osoita palavien nesteiden käyttöä tai epätavallisen korkeita lämpötiloja palon aikana.

4.1.7 Lämpölaajeneminen ja materiaalien muodonmuutokset

Monet materiaalit muuttavat muotoaan tulipalossa joko tilapäisesti tai pysyvästi. Melkein kaikki materiaalit laajenevat lämmitessään. Harmathy (1995) on tehnyt laajan yhteenvedon rakennusmateriaalien ominaisuuksista eri lämpötiloissa aina palolämpötiloihin saakka. Kappaleen (pituus l) laajenee matkan Δl lämpötilan noustessa määrän ΔT , jolloin

$$\Delta l = \alpha \Delta T \quad (19)$$

missä α on materiaalin lineaarinen lämpöpiteneemiskerroin. Korkeissa lämpötiloissa rakenteet laajenevat merkittävästi ja niihin syntyy voimakkaita lämpöjännityksiä, jotka aiheuttavat niihin pysyviä muodonmuutoksia (Parkus 1976). Nämä saattavat vaikuttaa jäykkien, kuormitettujen rakenteiden stabiilisuuteen erityisesti, jos nämä ovat eri materiaaleista ja jos toinen laajenee huomattavasti enemmän kuin toinen. Pahimmassa tapauksessa seurauksena on rakenteiden sortuminen. Lämpölaajenemisen lisäksi faasimuutoksilla on suuri merkitys materiaalien käyttäytymiselle korkeissa lämpötiloissa.

Teräspalkit ja pilarit alkavat menettää lujuuttaan, kun lämpötila nousee yli 550 °C, ne taipuvat ja menettävät lopulta täysin kantokykynsä. Taipuminen on sitä suurempaa, mitä suurempi on teräksen kuormitus. Taipuminen ei johdu teräksen sulamisesta, vaan plastisesta muodonmuutoksesta.

Teräspalkin taipuminen voi johtua myös lämpölaajenemisesta, jos laajeneminen palkin päissä on estetty. Rakenne nurjahtaa ja taipuu niin paljon, että laajentunut palkin kaari mahtuu käytettävissä olevaan tilaan. Teräsrakenteiden muodonmuutoksista ja lujuuden menetyksistä on kattava esitys SFPE:n käsikirjassa (Milke 1995, Harmathy 1995).

Rappaus saattaa myös irrota alustastaan lämpölaajenemisen vaikutuksesta ja muodostaa paikallisia V- tai U-muotoisia jälkiä osoittaen eri tavalla lämmenneitä kohtia.

4.1.8 Savu ja noki

Puhekielessä savulla tarkoitetaan aerosolia, kaasumaisten palamistuotteiden ja pienten hiukkasten seosta. Savun tarkasta tieteellisestä määritelmästä ei olla täysin yksimielisiä (ISO Guide 52, 1990). Kuumassa savussa höyrynä olevat vesi ja erilaiset raskaat palamattomat kemialliset yhdisteet (kreosootit (tervat), raskaat hiilivedyt jne.) saattavat tiivistyä kylmille pinnoille. Noki on epätäydellisen palamisen tuloksena liekissä syntynyttä, pääasiassa hienojakoista hiiltä. Lähes kaikki nesteet ja jähmeät aineet palavat valaisevalla nokisella liekillä. Kun liekki koskettaa lähellä olevaa pintaa, se nokeutuu tavallisesti. Erillinen liekin jättämä nokijälki osoittaa, missä tietty palanut aine on ollut.

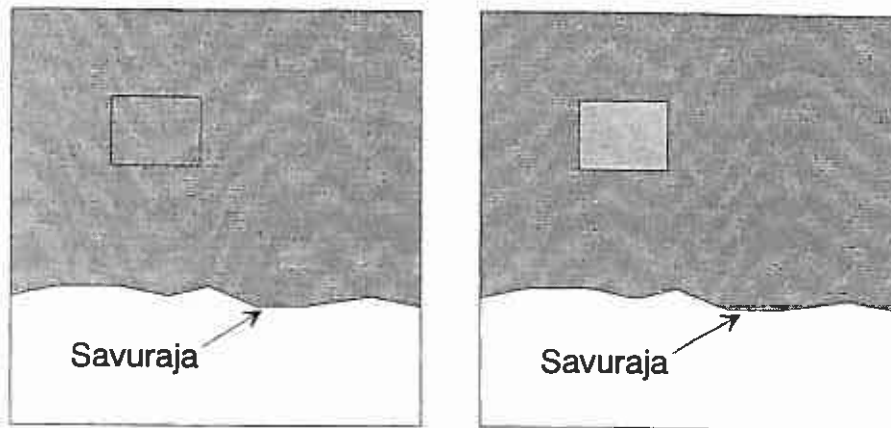
Noki laskeutuu myös savusta pinnoille. Nämä yleiset nokijäljet osoittavat nokea muodostuneen lähiympäristössä viittamatta tiettyyn lähteeseen.

Savusta ja noesta saostuu ainetta rakennuksen tai siinä olevien esineiden kylmemmille pinoille kuten paloa lähellä olevien huoneiden kattoon ja seinien yläosiin. Pinoille saostuneiden savun aineosasten (tervat) väri on ruskean eri vivahteita ja nokijälkien väri on musta. Tavallisesti jäljet syntyvät savusaostuman ja noen sekoituksesta. Fysikaalisista prosesseista, kuten termoforeesista, jotka erottavat aerosolista hiukkasia pinoille on laajempia esityksiä Hindsin (1982, s. 153 - 163) ja Friedlanderin (1977, s. 24 - 49) kirjoissa.

Sekä savu- että nokijäljet voivat palaa kokonaan pois palamattomilta pinoilta jättäen puhtaan alueen, jonka ympärillä on usein palamistuotteiden tummentama alue (esimerkkejä luvussa 4.3, kuvat 4.16 ja 4.18). Tällainen puhtaaksi palanut alue syntyy tavallisesti suorasta liekkikosketuksesta tai voimakkaasta lämpösäteilyvirrasta. Vaikka nämä alueet osoittavat voimakasta lämpiämistä, ne eivät välttämättä osoita syttymiskohtaa. Puhtaaksi palaneen alueen ja nokeentuneen alueen rajaviivat voivat osoittaa palon etenemisen suuntaa tai palon voimakkuuden tai keston eroja. Puhtaaksi palanutta aluetta ei pidä sekoittaa vaaleaan lohkeilleeseen alueeseen. Nämä eroavat toisistaan siten, että lohkeilleen alueen pinnasta on hävinnyt rakenteeseen kuulunutta ainetta.

Savua muodostuu yleensä huomattavasti jokaisessa palossa, rakennuspaloissa erityisesti palon happirajoitteisessa vaiheessa, missä palo on kasvanut melko suureksi, mutta ikkunat ja ovet eivät ole vielä rikkoutuneet. Ovien ja ikkunoiden asento on usein pääteltävissä tarkastelemalla saranoiden, karmien, puitteiden reunojen, lukkojen, salpojen ym. savujälkiä. Savujäljet ulkoseinällä oven yläpuolella osoittavat usein, että ovi on ollut auki, ja savujälkien puuttuminen, että ovi on ollut kiinni. Savujälkien tulkitseminen ei kuitenkaan ole aivan suoraviivaista. Savu menee hyvinkin pienien rakojen läpi ja suljettujenkin ovien reunoissa ja niiden yläpuolella saattaa olla savujälkiä. Vertailemalla moniosaisissa ikkunoissa ja niiden yläpuolella olevia savujälkiä voidaan selvittää, onko joku niistä ollut auki palon aikana edellyttäen, etteivät ikkunat ole rikkoontuneet. Savu- ja nokijäljet ovien ja ikkunoiden yläpuolella voivat myös osoittaa ilmavirtauksen suuntaa palon aikana. Ulkotiloissa kuitenkin varmin virtauksen, ts. tuulen suunnan, osoitus saadaan aina jälkikäteenkin Ilmatieteen laitoksen sääpalvelusta.

Jos huone on nokeentunut, niin jokaisen siinä olevan esineen, taulun, kirjan, kynän ym., alkuperäinen sijainti seinällä, pöydällä tai muulla pinnalla ilmenee savujäljestä (kuva 4.5) siten, että esine suojaa alla olevaa pintaa nokeentumiselta. Tämä toimii myös kääntäen siten, että väitettäessä jokin esineen olleen tietyssä paikassa palotilassa sieltä tulisi löytää vaaleampi jälki siitä kohdasta, jossa esine olisi suojannut alla olevaa pintaa.



Kuva 4.5. Nokeentuneen huoneen seinällä oleva taulu (suorakaide vasemmassa kuvassa) suojaa alla olevaa pintaa (ainakin osittain) nokeentumiselta ja jättää vaaleamman jäljen seinään (oikea kuva).

Pistorasioiden ja pistokkeiden savujäljistä voidaan samalla tavalla päätellä, onko siihen liittyvä sähkölaite ollut kytkettynä sähköverkkoon palon aikana. Sähkökatkaisimien asento palon aikana selviää myöskin usein niissä olevista savujäljistä.

4.1.9 Ikkunalasit

Yleistä

Tulipalon vaikutus ikkunalasiin riippuu monesta tekijästä kuten lämpenemisnopeudesta, lasin reunojen lämpöeristyksestä, ikkunanpuitteiden aiheuttamista jännityksistä lämpöjännitysten aiheuttamien muodonmuutosten estäjänä, mahdollisesta liekkikosketuksesta ja lasin jäähtymishistoriasta. Seuraava esitys käsittelee tavallista tasomaista ikkunalasia. Ikkunoiden rikkoutumisesta tulipalossa voidaan sanoa monenlaista ja siksi sen mekanismien ymmärtäminen on tärkeää. Keski-Rahkonen on kehittänyt lasin rikkoutumismekanismien teoriaa tulipaloissa (1988a, 1990, 1991), ja Skelly ym. (1991) tekivät kokeita, jotka osoittavat tämän mallin toimivan pienen tilan tulipalossa. Joshi ja Pagni ovat jatkaneet työtä käsittelemällä säteilylämmönsiirtoa epälineaarisenä ilmiönä (1994a) ja mittaamalla lasin murtolujuutta (1994b).

Tulipalossa syntynyt ylipaine ei yleensä riitä rikkomaan rakennuksen ikkunoita tai työntämään niitä ulos puitteista. Tavanomaisen ikkunalasin rikkoutumiseen tarvittavat ylipaineet ovat luokkaa 2,1 ... 6,9 kPa kun tulipaloissa syntyneet ylipaineet ovat yleensä luokkaa 10 ... 30 Pa (NFPA 921, 1995).

Ikkunalasi saattaa rikkoutua muistakin syistä kuin tulipalosta. Tavallinen tapa päästä rakennukseen ilman lupaa ja avainta on ikkunan rikkominen. Palokunta

tulee myös joskus ikkunan kautta rakennukseen ja rikkoo ikkunoita myös savutuuletuksen takia.

Eräs mahdollisuus saada tietoa tästä asiasta on savujäljistä. Jos ikkuna on särkynyt ennen paloa, sirpaleissa ei todennäköisesti ole savua, mutta jos särkyminen on tapahtunut palon aikana, niin lasissa on savujälkiä toisella tai molemmilla pinnoilla. On kuitenkin syytä ottaa huomioon mahdollisuus, että sammutusvesi on saattanut huuhtoa pois savujäljet. Lisäksi on mahdollista että ikkunalasi on ollut niin lähellä kuumaa kohtaa tai liekkiä, että noki on palanut pois.

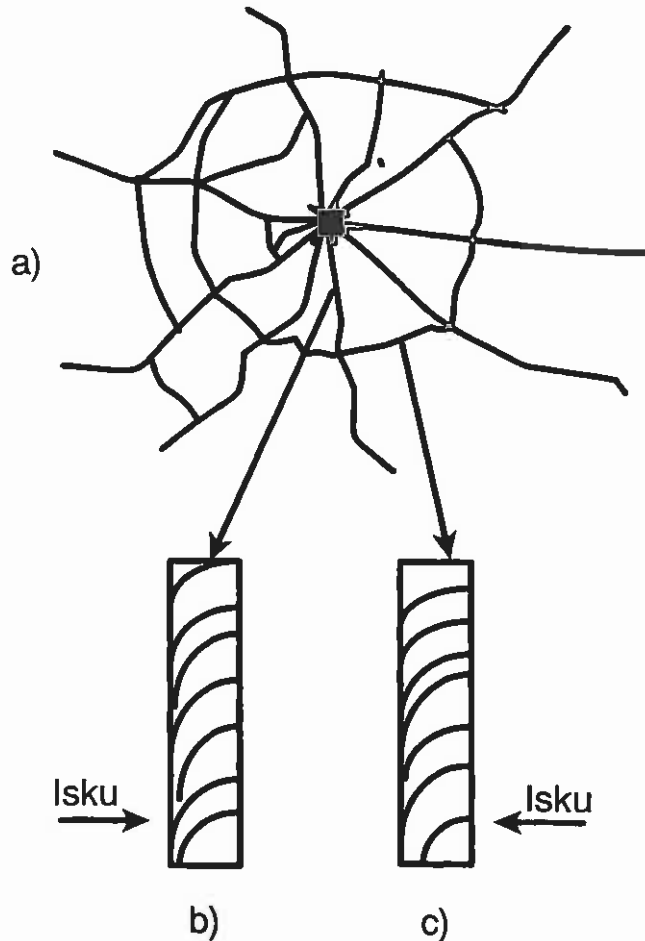
Lasin eri rikkoontumismekanismeja

Lasin rikkoutuminen iskusta

Lasin rikkoutuminen iskusta jättää yleensä hämähäkkiverkkokuvion, missä on säteittäiset ja samankeskiset säröt (kuva 4.6 a). Haljenneen lasin reunojen säröistä voidaan päätellä kummalle puolelle ikkunasta isku on osunut (Cooke & Ide 1985).

Lähellä iskukohtaa olevien säteittäisten halkeamien reunojen jäljet muodostavat lähes suoran kulman lasin pinnan kanssa iskun vastakkaisella puolella. Samankeskisten halkeamien reunojen jäljet muodostavat lähes suoran kulman lasin pinnan kanssa iskun puolella eivätkä ole yhtä ilmeisiä (kuva 4.6 b ja c).

Kauempana iskukohdasta olevien reunojen jäljet voivat olla tulkittavissa eri tavalla. Iskun suunnan arviointi olisi siksi tehtävä lähellä iskukohtaa olevien säteittäisten halkeamien reunojen jälkien perusteella. Tätä varten joudutaan yhdistämään ikkunan osia palapelin tavoin. Ikkunalasi murtuu yleensä lisää pudotessaan lattialle tai maahan, eivätkä näiden murtumien reunojen jäljet ole muiden jälkien tapaisia.



Kuva 4.6. a) Lasin rikkoutuminen iskusta jättää yleensä hämähäkkiverkkokuvion missä on säteittäiset ja samankeskiset halkeamat. b) Lähellä iskukohtaa olevien säteittäisten halkeamien reunojen jäljet muodostavat lähes suoran kulman lasin pinnan kanssa iskun vastakkaisella puolella. c) Samankeskisten halkeamien reunojen jäljet muodostavat lähes suoran kulman lasin pinnan kanssa iskun puolella.

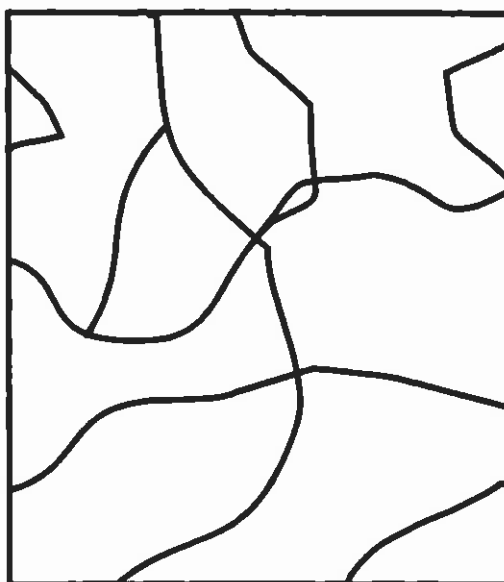
Lasin rikkoutuminen lämpöjännityksistä

Lasin rikkoutuessa lämpöjännityksistä, kolme erilaista prosessia muodostavat tyypilliset kuviot, joista mekanismi voidaan tunnistaa.

Lasin rikkoutuessa **vetojännityksestä ruudun reunasta** kuvio eroaa iskun aiheuttamasta särkymisestä kahdella tavalla:

1) Säröt alkavat ruudun reunoista (ei kulmista) ja jatkuvat ruudun keskiosia kohden satunnaisesti aaltoillen (kuva 4.7). Iskun aiheuttamat säröt etenevät lähes suoraan.

2) Lämpöjännityksestä haljenneen lasin reunoissa ei ole kuvan 4.6 b tai c tapaisia jälkiä, vaan reuna on lähes tasainen.



Kuva 4.7. Lämpöjännityksien aiheuttamat säröt alkavat ruudun reunasta (ei kulmista) ja etenevät aaltoillen keskemälle (Skelly ym. 1991).

Tämä lienee tulipalossa yleisin ikkunaruu­tu­jen rikkoutumismekanismi ja aiheutuu ruudun epätasaisesta lämpiämisestä. Vapaana oleva ruutu lämpenee palon lämpösäteily­stä tai kuumien kaasujen kosketuksesta. Puitteen sisällä oleva ruudun reuna on suojattu tältä lämpiämiseltä, koska puite on hyvä lämmöneriste ja ruutua massiivisempi. Siten ruudun puitteen sisällä oleva reuna on kylmempi kuin muu ruutu. Lasin lämpölaajeneminen aiheuttaa reunaan vetojännityksen. Lasi hauraana materiaalina ei kestä kovin suuria vetojännityksiä ja reunassa on työstön seurauksina jo mikroskooppisen pieniä säröjä, jotka lisääntyvän jännityksen myötä lähtevät nopeasti kasvamaan. Riittävän korkeissa lämpötiloissa nämä säröt kasvavat poikki ruudun (kuva 4.7). Lämpötilaeroista syntyvä vetojännitys σ ruudun reunassa voidaan laskea kaavalla (Keski-Rahkonen 1988a)

$$\sigma = E\alpha(T_k - T_m) \quad (20)$$

missä E on lasin kimmokerroin, α lämpölaajenemiskerroin sekä T_k ja T_m ruudun korkein ja matalin lämpötila. Tavalliselle soodalasille $E = 70 \text{ GPa}$, $\alpha = 8 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ ja vetomurtolujuus $\sigma = 50 \text{ MPa}$. Siten jo $90 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilaero lämmölle altistuneen ja lämmöstä eristetyn ikkunalasin välillä aiheuttaa pitkiä halkeamia puitteen reunasta lasiruudun keskiosiin (kuva 4.7). Tämä lämpötila riippuu lasimateriaalista ja sen lämpökäsittelystä. Vetolujuus karkaistuilla laseilla on moninkertainen karkaisemattomiin verrattuna. Koska lasi on haurasta ainetta, murtolujuuden hajonta on suuri (Joshi ja Pagni 1994b) ja siksi myös rikkoutumislämpötilat voivat vaihdella siten, että jopa $60 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilaero riittää rikkomaan ruudun.

Estetty muodonmuutos. Kun lasinruutua kuumennetaan hitaasti, se taipuu kuumalle puolelle päin ja muodostaisi täysin vapaana tasaisessa lämpötilakentässä pallopinnan. Kun ruutu on kiinnitetty kehykseen, muodonmuutos estyy osaksi siksi, miten tiukasti kiinnitys on tehty. Todellinen ruutu on jossain jäykästi kiinnitetyn ja vapaasti tuetun laatan välimailla (Ylinen 1950, s. 822), mutta todennäköisesti lähempänä jälkimmäistä. Tällä olettamuksella suurimmaksi vetojännitykseksi kulman lähellä saadaan samanmuotoinen lauseke kuin yhtälö (20) yllä, mutta sen edessä on tekijä 1/2 (Roark 1965, s. 374 - 375). Siinä yhtälössä lämpötilaero on kuitenkin saman ruudun eri pintojen välinen ero, joka on aina lasin hyvän lämmönjohtumisen ja ruudun ohuuden vuoksi huomattavasti pienempi kuin saman ruudun kylmimmän ja kuumimman pisteen välinen ero. Siten myös estetystä muodonmuutoksesta johtuvat jännitykset ovat pieniä reunan vetojännitykseen verrattuina ja aiheuttavat harvoin ikkunan rikkoutumisen.

Lämpösokki. Liekin kosketus lasin pintaan saa aikaan kosketuskohtaan voimakkaan lämpötilaeron. Tämä lämpösokkina tunnettu ilmiö (vrt. kohta 4.1.4) aiheuttaa ruudun paksuussuuntaan jännityskentän (Boley ja Weiner 1960, s. 283 - 287), joka kuorii lasin pinnasta ohuita kerroksia lasin leikkauslujuuden ylityttyä, mutta riittää riittävän voimakkaana vaikuttaen murtamaan koko ruudun. Suurin lämpöjännitys, joka on myös rikkoutumishetki, syntyy äkillisesti lämmitettäessä hyvin nopeasti, lasilla alle 10 s:n kuluttua lämmittämisen aloittamisesta. Koska lasi johtaa lämpöä suhteellisen hyvin, lämpösokkia ei synny hitaasti lämpiävään ruutuun, kun lämpenemisaika on huomattavasti yli 10 s. Siten äkillinen liekin kosketus, äkillinen suuren liekin syntyminen esim. kaasun tai nestelämmikön palossa tai äkillinen jäähdyttäminen vesisuihkun osuessa kuumaan ruutuun ovat tärkeimmät tavat aiheuttaa tulipalossa ruudun lämpösokki.

Vesipisara jäähdyttää ruutua vain pisaran halkaisijaan verrannolliselta alueelta. Jos kuuma lasi jäähdytetään nopeasti esimerkiksi sammutusvedellä, lasin vesisumun puoleiseen pintaan muodostuu yleensä pieniä kuoppia. Niiden halkaisija on pisaran halkaisijan suuruusluokkaa, ja ne ovat aiheutuneet ohuen lasikerroksen leikkautumisesta irti ruudun pinnasta pisaran iskukohdasta. Kun vettä on niukasti, koko ruutu ei välttämättä rikkoudu. Jälkien perusteella voidaan arvioida, mistä suunnasta ensimmäiset vesisuihkut ovat tulleet palon tähän osaan.

Räjähdyks

Räjähdyksessä rikkoutunut ikkunalasi hajoaa yleensä pieniksi siruiksi ja/tai pitkiksi, kapeiksi suikaleiksi. Räjähdyksessä sirpaleet lentävät selvästi pidemmän matkan kuin lämpöjännityksen särkemät ikkunalasit (vertaa kohta 9.5.3).

4.1.10 Kokonpainuneet kalusteiden jouset

Kalusteiden, kuten tuolien ja sänkyjen, kokonpainuneet jouset eivät ole osoitus palavien nesteiden käytöstä tai kytevästä palosta. Tutkimuksissa (Tobin ja Monson 1989) on osoitettu, että jousien kuumentumiseen liittyvä jännityksen häviäminen riippuu lämpökäsittelyn kokonaishistoriasta. Sekä lyhytaikainen lämmittäminen korkeissa lämpötiloissa että pitkäaikainen lämmittäminen verraten matalissa lämpötiloissa (noin 400 °C) voivat päästää jousia siten, että niiden jännitys laukeaa. Jousien kuormittaminen lämmittämisen aikana voimistaa jännityksen häviämistä.

4.2 PALOJÄLKIEK SIJAINI JA MUOTO

Palojälkiä voi löytää pinnalta, joka on altistunut paloilmioille. Tällaisia ovat mm. rakennuksen sisä- ja ulkopuoliset pinnat ja rakenteet sekä palopaikkaa ympäröivät kohteet.

Seinille jääneet jäljet voivat olla lämmön jättämiä rajajälkiä tai syvemmän palamisen jälkiä. Jos seinien pinnoitteet ovat osittain tai kokonaan tuhoutuneet tulipalossa, alla olevissa rakenteissa voi olla erilaisia palojälkiä. Nämä seinissä olevat jäljet ovat usein "V"- tai "U" -jälkiä, puhtaaksi palaneita alueita tai murtumia.

Katot

Huoneiden kattojen lisäksi tulisi kiinnittää huomiota pöytien, hyllyjen ja muiden vaakasuorien pintojen alla oleviin palojälkiin. Koska liekki ja kuumat palokaasut nousevat ylöspäin nosteen vaikutuksesta, niin lämmön vaikutus on voimakkain suoraan lämmönlähteen yläpuolella. Siten pöytien ja hyllyjen alaosien palojäljet voivat olla osoitus lämmönlähteestä. Vaikka tasopinta suoraan lämmönlähteen yläpuolella joutuu tavallisesti suuremman lämpörasituksen alaiseksi kuin ympäristö, saattaa olla tapauksia, missä alkuperäinen lämmönlähde palaa nopeasti loppuun, mutta palo leviää enemmän palokuormaa sisältävälle alueelle, ja kestää siellä pitempään ja aiheuttaa suuremmat vahingot.

Vaakasuorien pintojen alapuolella olevat jäljet ovat karkeasti ottaen ympyränmuotoisia tai ympyrän kehän osan muotoisia reunojen tai seinämien lähellä. Ympyrän keskipiste määritetään, ja tarkistetaan, onko sen alapuolella ollut lämmönlähteitä.

Lattiat

Lattioiden ja lattiapäällysteiden palojäljet voivat johtua mm. palavista kalusteista, lattialle sulaneista palavista muoveista, lattialla olleista palavista nesteistä sekä kuumasta kaasukerroksesta ja liekeistä huoneen yläosassa. Huoneen lieskahduksen aikana ja sen jälkeen kuumen kaasukerroksen säteilyvirrantiheys ylittää 20 kW/m². Tavalliset palavat rakennusmateriaalit syttyvät tällä säteilytasolla.

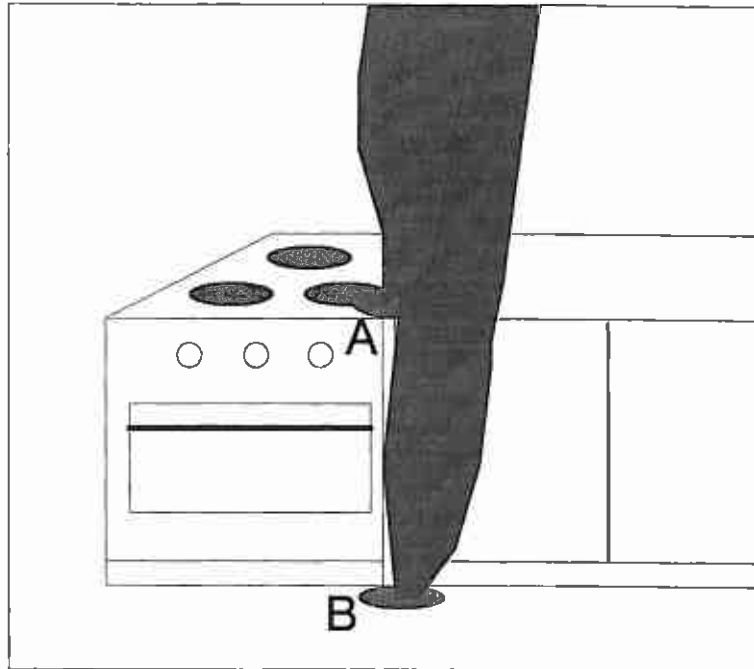
Lattialautojen ja ovien kynnysten välisissä saumoissa tai raoissa voi olla palojälkiä, jotka johtuvat säteilystä tai saumoihin kertyneestä palavasta nesteestä. Mikäli huone ei ole lieskahtanut, palaminen lattialautojen saumoissa voi olla osoitus palavista nesteistä ja laboratorionäytteen ottaminen voi selvittää tämän asian.

Lieskahduksen jälkeinen palo voi aiheuttaa lattioihin ja kynnysten ympärille reikiä huoneessa olevien hyvin kuumien palokaasujen ja rakennuksessa olevien paikallisten, ilmaa syöttävien rakojen takia. Palanutta lattiaa on hyvä verrata palamattomiin osiin, mikäli sellaisia on, lattian alkuperäisen kunnon selvittämiseksi.

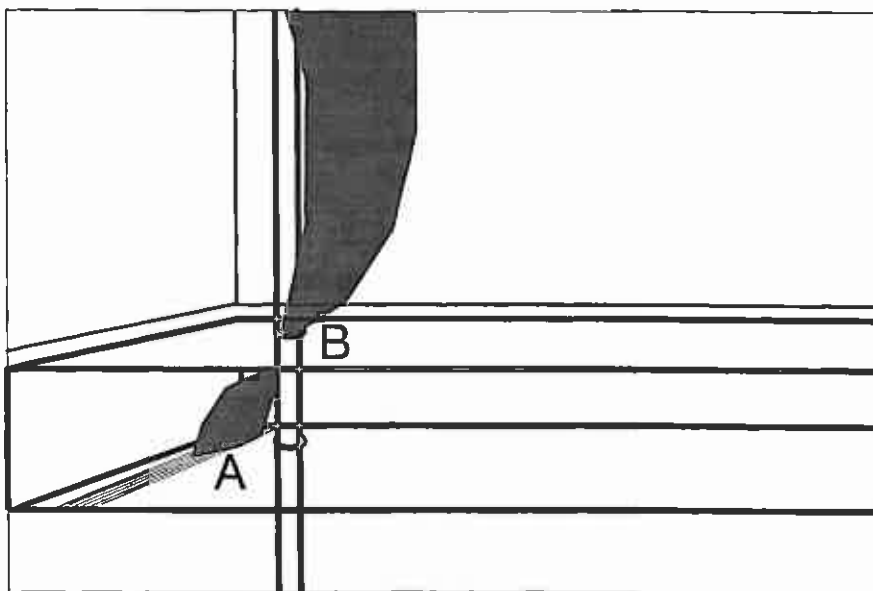
4.2.1 Palojäljen matalin kohta

Tulipalo leviää tavallisesti ylöspäin. Palojälkien matalin kohta on silloin todennäköisesti lämmönlähteen läheisyydessä. On kuitenkin huomattava, että lämmönlähde palojäljen matalimman kohdan lähellä ei välttämättä ole alkuperäinen syttymiskohta. Palon aikana palava materiaali voi pudota ja jatkaa palamistaan alemmalla tasolla, levittää paloa sekä jättää sieltä alkavia palojälkiä (kuva 4.8). Tämä koskee erityisesti muovimateriaaleja, jotka palaessaan muodostavat valuvia tai tippuvia palavia osia ja levittävät paloa alaspäin sekä jättävät palamisjälkiä syttymiskohdan alapuolelle.

Palo voi myös levitä ylöspäin esim. putken läpiviennistä kerroksesta toiseen, jolloin palojälki näyttää päättyneen lattiatasoon (kuva 4.9). Alimman kohdan merkitys alkuperäisen syttymiskohdan selvittämisessä ei ole yksiselitteinen, joten kaikki mahdolliset vaihtoehdot pitää ottaa huomioon.



Kuva 4.8. Sähkölieden päällä syttyneestä kankaasta A on pudonnut palavia osia lattialle ja siellä syttynyt palo B on jättänyt lattiasta alkavia palojälkiä (Phillipsin & McFaddenin (1982) mukaan).



Kuva 4.9. Lattian alla olevat kaapelit ovat syttyneet kohdassa A, mistä palo on levinnyt putken läpiviennin B kautta lattian yläpuolelle. Palojälki huoneessa näyttää päättyvän putken läpivientiin B (Phillipsin & McFaddenin (1982) mukaan).

4.2.2 Palojälkien muoto

Tulipalossa syntyy erilaisia palojälkiä, joista muutamia tunnusomaisia on yleisesti otettu kirjallisuudessa esille. Jäljille on annettu niiden ulkomuotoja kuvaavia nimiä. Yleispätevää ohjetta palojälkien tulkinnalle ei voida antaa, koska yksittäiset tulipalot eroavat sen verran toisistaan, että samannäköisen jäljen syy saattaa eri tulipaloissa olla erilainen. Seuraava esitys käsittelee joitakin usein esiintyviä muotoja, mutta ei ole sataprosenttisesti kattava (NFPA 921 1995).

V-jälki

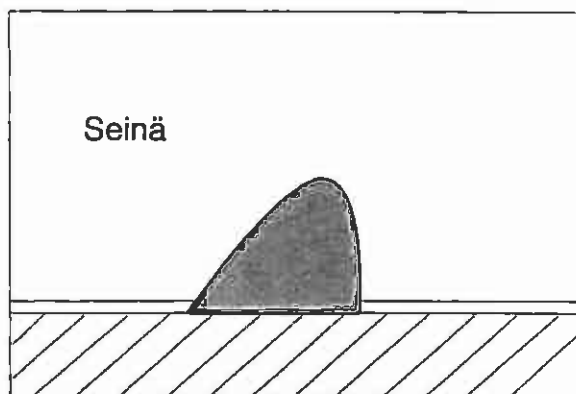
V-muotoinen jälki on yleinen palojälki pystysuorilla pinnoilla: seinillä, ovilla, kalustojen sivustoilla ym. Jälki syntyy kun palopatsas kohtaa katon tai muun esteen ja palokaasut ja liekit leviävät sivuille (luku 4.3, kuvat 4.15 - 4.18).

V-kuvion kaltevia rajaviivoja voi usein seurata ylhäältä alaspäin kuvion kapenevaan osaan. Kuvion kärki tai sen alin osa saattaa silloin olla syttymiskohdan läheisyydessä. Yleisesti voidaan sanoa, että mitä tylpempi tai leveämpi V-kuvion alaosa on, sitä kauemmin palanut materiaali on ollut altistunut lämmölle palavien seinien tapauksessa. Samoissa palo-olosuhteissa V-kuvion kulma on leveämpi pystysuoralla palavalla kuin palamattomalla tasolla.

NFPA:n ohjeessa 921 (1995) korostetaan, että käsitys kapeiden V-kuvioiden liittymisestä nopeisiin paloihin ja leveiden V-kuvioiden liittymisestä hitaisiin paloihin on väärä. Yleisesti V-kuvion rajaviivojen kaltevuus riippuu lämmönlähteen koosta, palamisnopeudesta, ilmanvaihto-olosuhteesta ja seinämateriaalista eikä yksinomaan palotehosta.

Ylösalainen V

Ylösalaiset V-kuviot ovat kolmionmuotoisia kuvioita, joiden kanta on alaspäin (kuva 4.10). Nämä ovat tavallisesti lattiatasosta nousevia lämmön ja liekkien aiheuttamia rajaviivoja. Kuviot syntyvät suhteellisen lyhytaikaisista paloista, joiden palopatsaat eivät kehity kattoon asti, tai palopatsaista, jotka eivät ole kattojen rajoittamia. Palon lyhyt kesto johtuu useimmiten siitä, että palo ei ole päässyt leviämään alkuperäisen lämmönlähteen palettua loppuun. Jäljet esiintyvät usein palamattomilla pinnoilla eivätkä ole levinneet ympäristöön.



Kuva 4.10. Ylösalainen V- kuvio lattianrajassa.

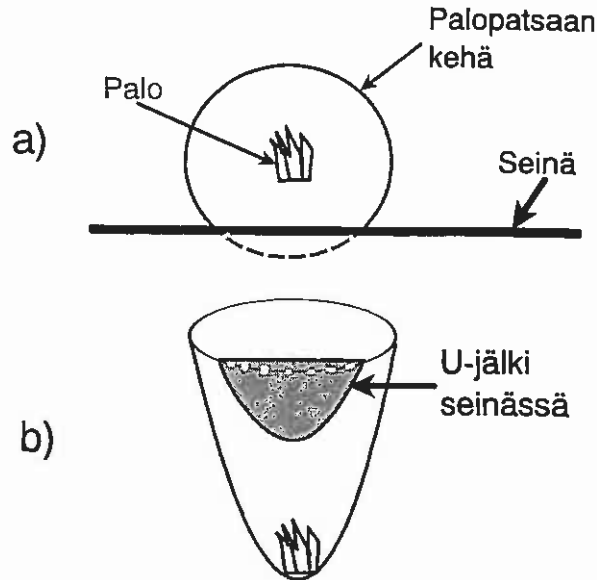
Esimerkiksi maakaasuvuodot ovat taipuvaisia muodostamaan ylösalaisia V-kuvioita erityisesti, jos vuoto on lattiatason alla ja jos kaasu vuotaa lattian ja seinän välisestä saumasta.

Tiimalasikuviot

Palavan aineen muodostama palopatsas on ihanteellisimmillaan kärjellään seisova kartio. Siten siinä ylöspäin nousevat kuumat kaasut muodostavat V:n näköisen kuvion palopatsaan leikatessa tasoa kuten seinää. Tämän alapuolella palavasta aineesta lähtevät liekit muodostavat ylösalaisin olevan V:n muotoisen kuvion. Kun kuumat kaasut osuvat pystytasoon, siihen jää V:n muotoinen jälki. Jos palava ainekin on hyvin lähellä seinää, siihen jää sekä liekkien että kuumien kaasujen muodostama jälki, joka muistuttaa tiimalasia. Ylempi V:n muotoinen kuvio on yleensä selvästi isompi. Pienemmässä alemmassa ylösalaisessa V-kuviossa on usein puhtaaksi palaneita alueita tai muuten voimakkaan palamisen jälkiä.

U-muotoiset kuviot

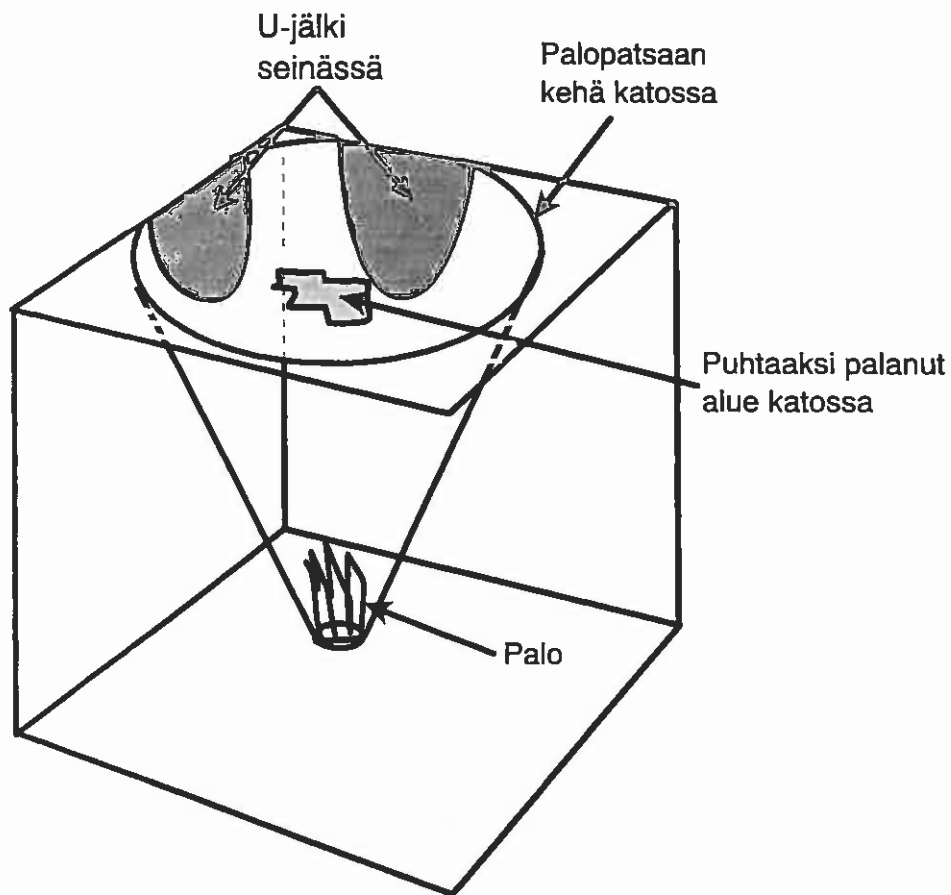
U-muotoiset kuviot eroavat V-kuvioista siten, että rajaviivat ovat kaarevammat ja alin kohta on paremminkin U:n kuin V:n muotoinen. Seinillä esiintyvät U-kuviot syntyvät, kun lämmönlähde on kauempana seinästä kun V-kuviota aiheuttava lämmönlähde. U-kuvion alin kohta on yleensä korkeammalla kuin vastaavan V-kuvion. Jos samasta lämmönlähteestä on syntynyt kaksi U-kuviota eri pinnoille, niin kuvio jonka alin kohta on alhaisempi, on lähempänä lämmönlähdettä. Kuva 4.11 selventää U-kuvion syntyä.



Kuva 4.11. U-kuvion muodostuminen seinään NFPA 921 (1995) mukaan. a) Seinä rajoittaa palopatsaan kehää, leikkaus ylhäältä katsottuna, b) seinän ja palopatsaan leikkaukseen on jäänyt U-muotoinen kuvio.

Katkaistu kartio huoneessa

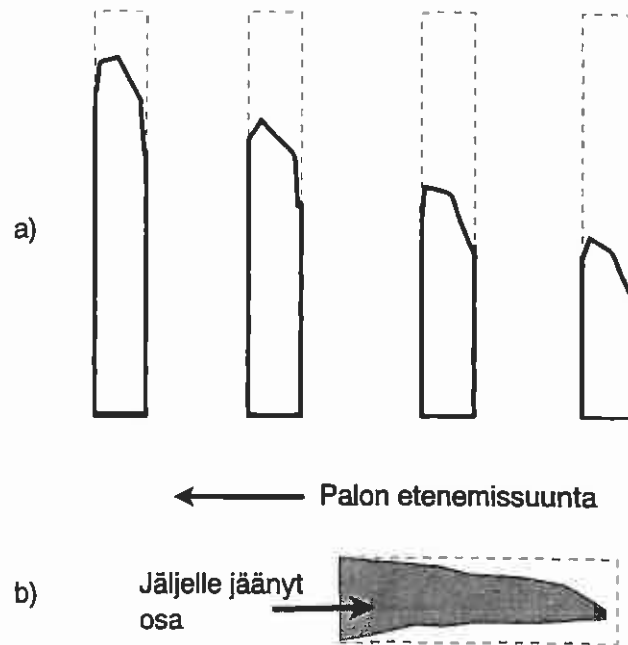
Sama palopatsas voi myös jättää huoneen seinille ja kattoon V:n, U:n, ympyrän tai muunmuotoiset jälkiä. Jäljet syntyvät kun katto- ja seinäpinnat katkaisevat palopatsaan tavanomaista leviämistä. Niiden perusteella on mahdollista kuvitella kolmiulotteisen palopatsaan sijainti huoneessa, kun kuvaamme sitä kärjellään seisovana katkaistuna kartiona. Kuva 4.12 selventää palopatsaan jättämiä jälkiä näille eri pinnoille. Äärellisen kokoinen palopesäke alhaalla on likipitäen ympyrän muotoinen. Siitä nouseva palopatsas on katkaistu kartio, jonka sivut ovat suorat. Seinien leikatessa palopatsasta niihin syntyy paraabelin muotoiset U-kuviot. Katossa palopatsaan leikkaus on ihanteellisesti ympyrä. Patsaan pystyakselilla on kuuminta, joten osa suoraan palopesäkkeen yläpuolella olevasta kattopinnasta on saattanut palaa puhtaaksi noesta. Vastaavat jäljet saattavat myös esiintyä huoneen sisustuksen pinnoilla.



Kuva 4.12. Katkaistun kartion muotoisen palopatsaan jättämät jäljet huoneen pinnoille NFPA 921 (1995) mukaan.

Osoitin- tai nuolikuviot

Seinien palaneiden pystytukien suhteelliset korkeudet, poisalaneen aineen muoto ja hiiltenisyvyys voivat osoittaa palon kehittymisen suuntaa. Mitä lyhyempi ja hiiltenyempi tuki on, sitä lähempänä lämmönlähdettä se on ollut (kuva 4.13 a). Tukien poikkileikkaukset muodostavat "nuolia" jotka osoittavat lämmönlähteen suuntaan (kuva 4.13 b). Nuolet syntyvät kun tuen terävät kulmat palavat pois tulen puoleiselta sivulta.



Kuva 4.13. a) Puisten pystytukien palovauriot pienenevät kun etäisyys palosta kasvaa, b) tuen poikkileikkaus "osoittaa" paloa kohti. Tuen alkuperäinen muoto on merkitty katkoviivalla. NFPA 921 (1995) mukaan.

Pitkät jäljet

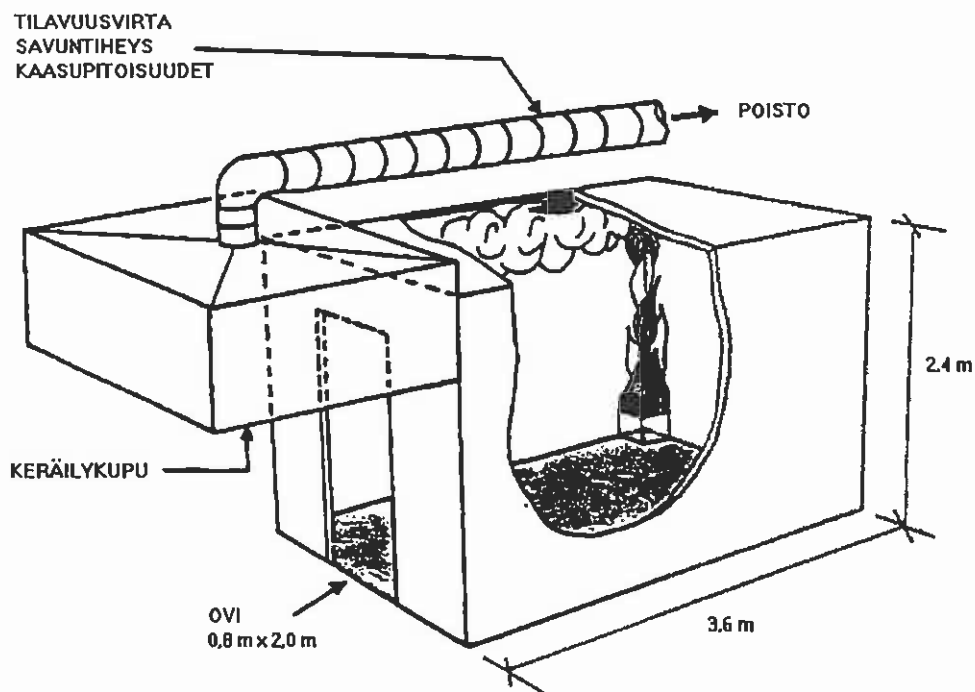
Rakennuksissa vaakasuorilla pinnoilla esiintyvät pitkät, likipitään suorat ja yhtenäiset jäljet voivat olla osoitus tahallaan sytytetystä palosta. Jäljet ovat silloin peräisin palavasta nesteestä, jähmeästä aineesta tai näiden yhdistelmästä, jota on levitetty palon leviämisen helpottamiseksi. Raivauksen yhteydessä on kuitenkin otettava huomioon mahdolliset suojaavat esineet, jotka ovat myös voineet olla jälkien aiheuttajia. Lattian kuluminen on myös eräs mahdollinen pitkien, yhtenäisten jälkien syy.

4.3 ESIMERKKEJÄ PIENEN HUONEEN PALOJÄLJISTÄ VALVOTUISSA OLOSUHTEISSA

Tässä luvussa esitetään esimerkkeinä neljä kuvasarjaa palosta pienessä huoneessa ja palon seiniin jättämistä palojäljistä. Kuvat ovat standardin ISO 9705 (1993) mukaan tehdyistä palokammiokokeista, joilla selvitetään pinnoite- ja sisustusmateriaalien palonlevittämismomenteja todellista huonepaloa vastaavissa olosuhteissa.

Testi suoritetaan palamattomasta materiaalista rakennetussa palokammiossa, jonka lattian pinta-ala on 2,4 m x 3,6 m sekä korkeus 2,4 m. Toisessa päädyssä on oviaukko, jonka mitat ovat 0,8 m x 2,0 m. Kammion kolme seinää ja katto pinnoitetaan tutkittavalla materiaalilla. Testin kesto on 20 minuuttia tai kunnes huone lieskahtaa.

Palo sytytetään huoneen takanurkassa sijaitsevalla propaanikaasupolttimella. Polttimen teho on 100 kW testin ensimmäisten 10 minuutin aikana ja sen jälkeen 300 kW testin loppuun asti. Testissä mitataan mm. paloteho, savun pitoisuus, ja lämpösäteilyvirran tiheys. Kuvassa 4.14 esitetään palokammio ja siihen kuuluva kaasujenkeräilyjärjestelmä.



Kuva 4.14. Palokammio ja siihen kuuluva kaasujenkeräilyjärjestelmä. Propaanikaasupoltin on vasemmassa takanurkassa (ISO 9705 (1993)).

Kuvien 4.15 - 4.18 testatut pinnoitemateriaalit, lieskahdusajanhetket sekä kokeiden kesto esitetään taulukossa 4.1. Kuvissa 4.15 - 4.18 esitetään tilanne ennen koetta tai sen alussa, palon kiivain vaihe sekä tilanne palon jälkeen. Kuvat on otettu joko huoneesta tai sen oviaukosta. Pinnoitemateriaalin pintaan oli piirretty ruudukko 0,3 m x 0,3 m jaolla palon etenemisen arvioinnin helpottamiseksi.

Tässä luvussa esitetyt testit on suoritettu VTT:n palotekniikan laboratoriossa osana tutkimusohjelmaa EUREFIC (European Reaction to Fire Classification) 1989-1991, missä tutkimuksen kohteena oli seinä- ja kattopinnoitteiden syttymis- ja palonlevittämisoima-ominaisuudet (Mangs ym. 1991).

Taulukko 4.1. Kuvien 4.15 - 4.18 palokammio-kokeiden materiaalit, lieskahdusajanhetket sekä kokeen kesto.

Materiaali	Lieskahdusajanhetki sytytyksestä (min:s)	Kokeen kesto (min:s)
Vaneri	2:17	2:30
Tapetoitu kipsilevy	11:00	20:00
Palosuojattu lastulevy	10:30	12:50
Palosuojattu vaneri	-	20:00

Vaneri (kuva 4.15)

Huone lieskahti 2 min 17 s sytytyksen jälkeen ja sammutettiin hiilidioksidilla 2 min 30 s sytytyksen jälkeen. Palon aiheuttamat jäljet vanerissa olivat pinnalliset. Poltinnurkassa näkyy tyypillinen V-kuvio sytytyspolttimen yläpuolella. Palavan kaasukerroksen korkeus lattiasta oli n. 1,2 - 1,5 m (kuva 4.15 b), mikä näkyy kuvassa 4.15 c palaneen ja palamattoman pinnan selvänä rajana.

Tapetoitu kipsilevy (kuva 4.16)

Huoneen nurkasta polttimen yläpuolelta tapettikerros ja noin puolet katon tapettikerroksesta paloi pois 100 kW polttimen teholla huoneen lieskahtamatta. Huone lieskahti 1 min kuluttua polttimen tehon nostamisesta 300 kW tasolle, jonka jälkeen huoneen kaikki tapettipinnat tuhoutuivat noin minuutin palon aikana. Testi sai jatkua 20 min asti. Kuvassa 4.16 d näkyy seiniä peittävä tasainen nokikerros poltinnurkkaa lukuunottamatta. Siellä propaanipolttimen liekki on polttanut noen pois jättäen selvän, puhtaaksi palaneen alueen jäljet. Vertaa kuvan

4.16 b 300 kW propaaniliekkiä ja puhtaaksi palaneen alueen jälkiä kuvassa 4.16 d, missä liekin muoto on lähes sama kuin puhtaaksi palaneen alueen muoto.

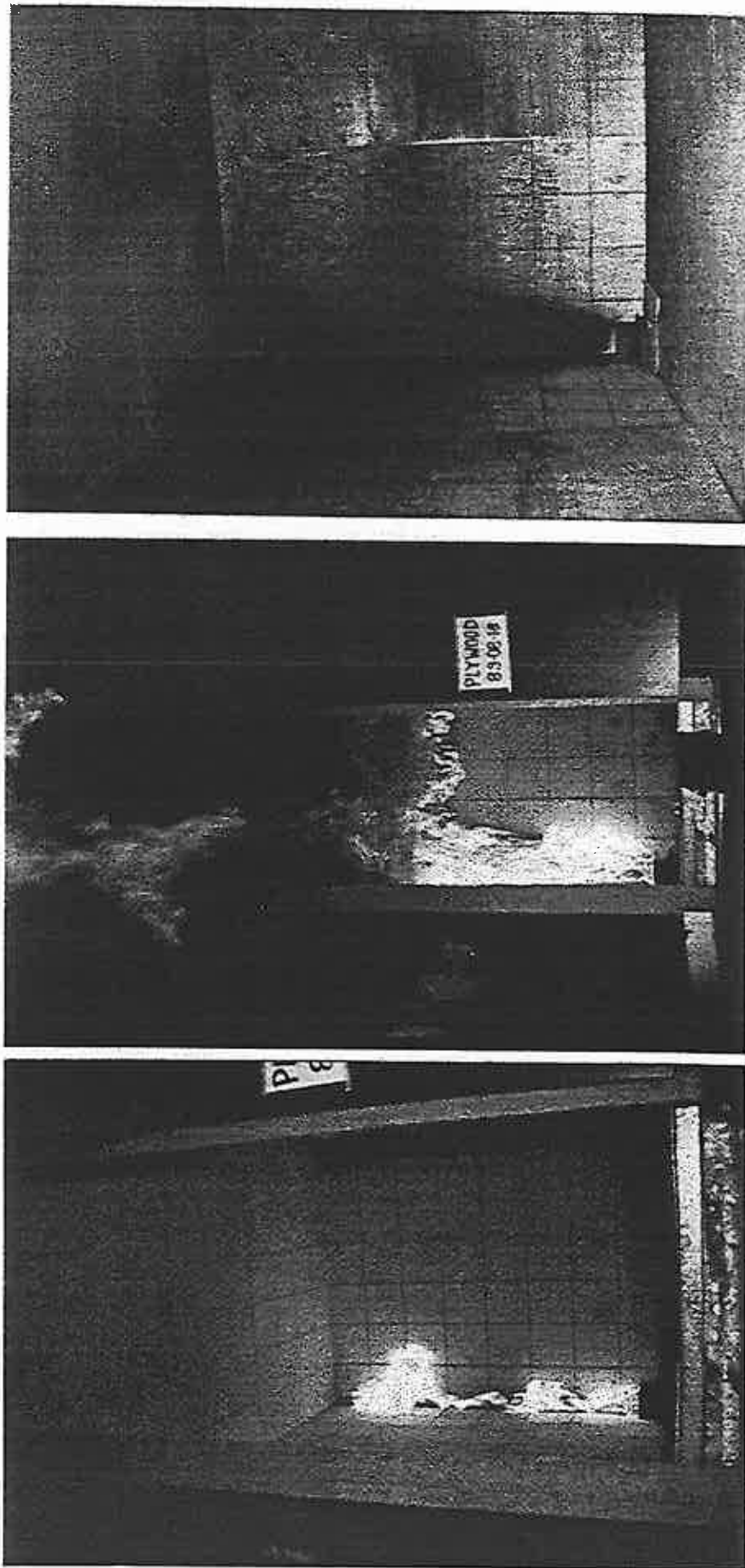
Palosuojattu lastulevy (kuva 4.17)

Pinnoitteet eivät syttyneet palamaan liekillä 100 kW polttimen teholla, mutta huoneen katon alle kertyi ohut savukerros. Huone lieskahti 30 s polttimen tehon nostamisesta 300 kW tasolle ja palo sammutettiin hiilidioksidilla 12 min 50 s sytytyksen jälkeen. Palon jättämät jäljet ovat pinnoitteeseen jäänyt nokikerros sekä halkeamia pinnassa. Vaurioituneen alueen raja osoittaa palavan kaasukerroksen laajuutta.

Palosuojattu vaneri (kuva 4.18)

Pinnoitteet eivät syttyneet palamaan 100 kW polttimen teholla. Pinnoitteet paloivat hitaasti 300 kW polttimen teholla, mutta huone ei lieskahtanut testin aikana. Kokeen aikana pinnoitemateriaali paloi propaanipolttimen liekkien läheltä, katossa, mistä kaikki kattolevyt putosivat lattialle, sekä seinien yläosasta katonrajassa. Poispalanut vaneri huoneen päädyssä (kuva 4.18 c) muodostaa V-kuvion, jonka kärki on polttimen kohdalla. Pinnoitteen palaneen alueen sekä nokeentuneen alueen rajat laskeutuvat polttimeen päin lähemmäksi lattiaa siirryttäessä.

Samoissa testiolosuhteissa syntyneet palojäljet kuvien 4.15 - 4.18 eri materiaaleissa ovat erilaisia, mutta kaikista löytyy karkeasti V-muotoinen jälki, jonka kärki on sytytyspolttimen kohdalla.



a)

b)

c)

Kuva 4.15. Vanerin palokammio koe standardin ISO 9705 mukaan. Syttymislähde propaanikaasupoltti näkyy vasemmassa alamurkassa. a) 30 s sytytyksestä, b) 2 min 30 s sytytyksestä huone on lieskahtanut ja c) kokeen jälkeen.



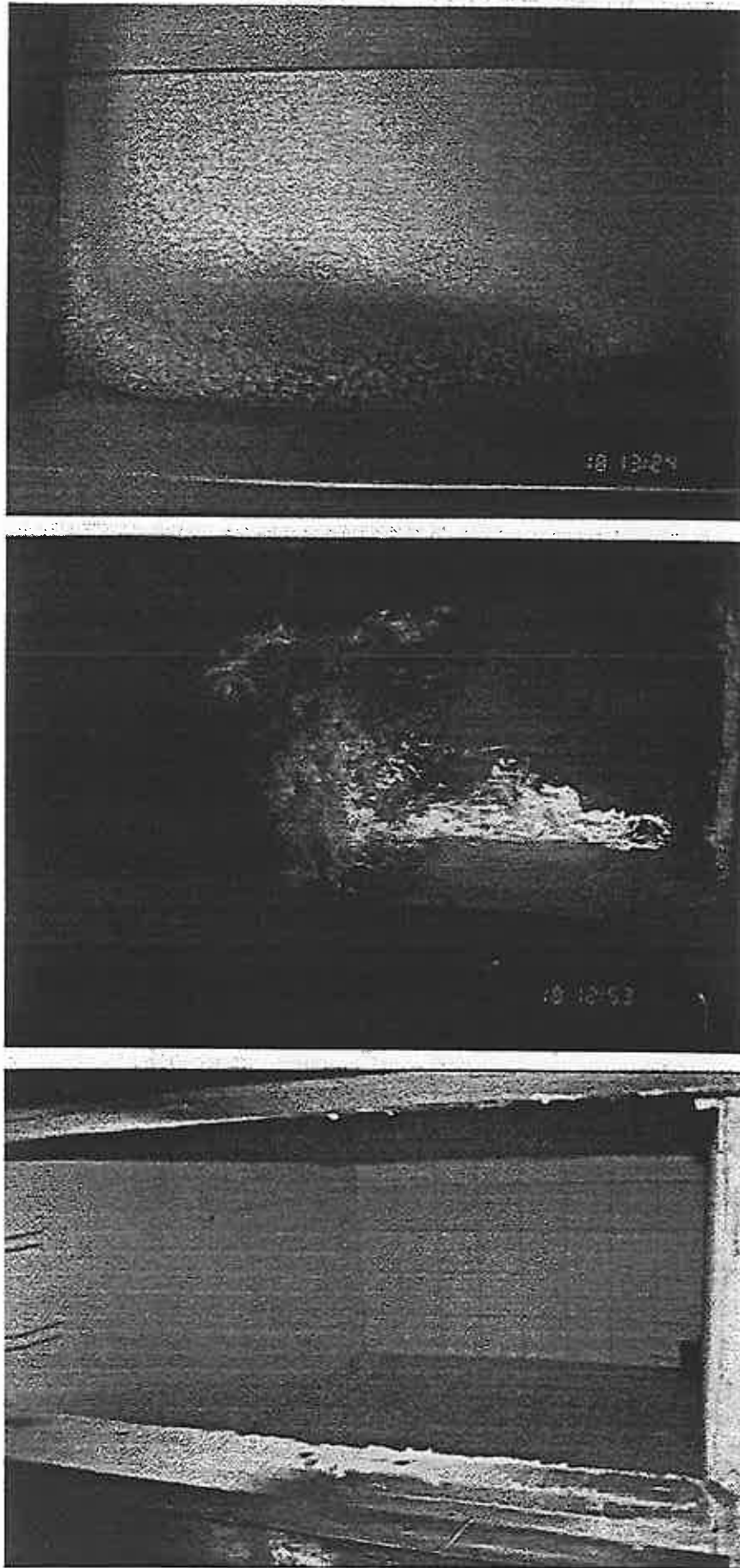
a)

b)

c)

d)

Kuva 4.16. Tapetoidun kipsilevyn palokammioke standardin ISO 9705 mukaan. Syttymislähde propaanikaasupolttin näkyy vasemmassa alanurkassa. a) ennen koetta, b) 10 min 33 s sytytyksestä eli 33 s polttimen tehon nostamisesta 300 kW tasolle, c) 11 min 34 s sytytyksestä huone on lieskahтанut ja d) kokeen jälkeen.

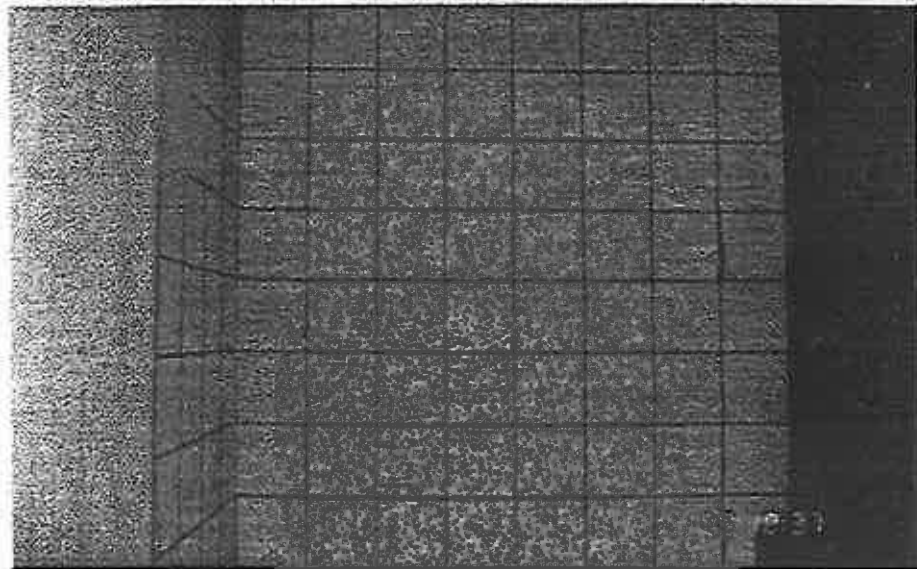


a)

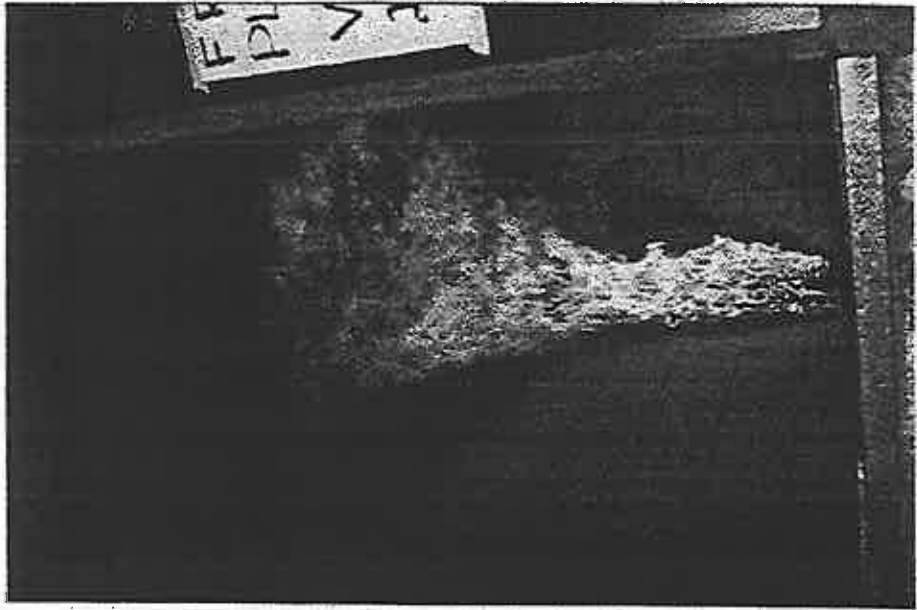
b)

c)

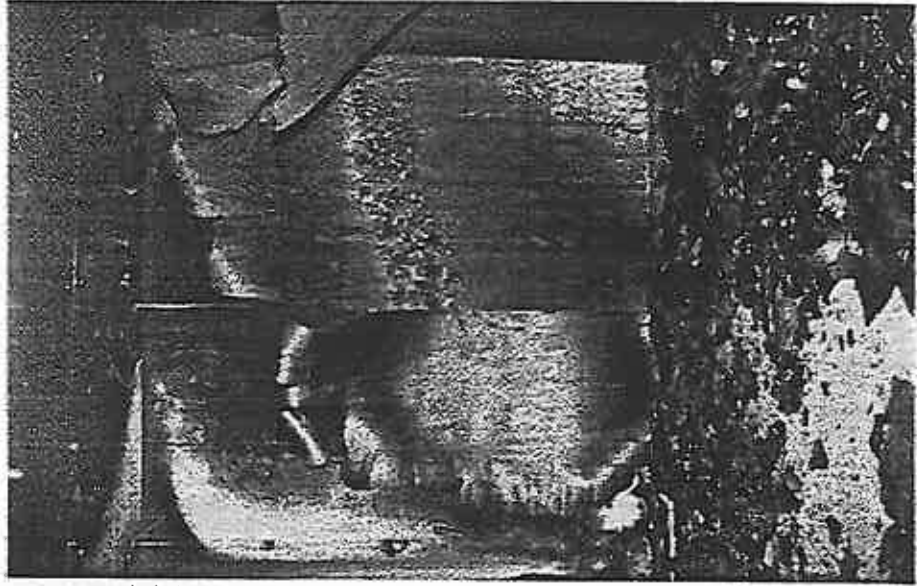
Kuva 4.17. Palosuojatun lastulevyn palokammiokoete standardin ISO 9705 mukaan. Syttymislähde propaanikaasupoltin näkyy vasemmassa alanurkassa. a) ennen koetta, b) 11 min sytytyksestä eli 1 min polttimen tehon nostamisesta 300 kW tasolle huone on lieskahtanut ja c) kokeen jälkeen.



a)



b)



c)

Kuva 4.18. Palosuojatun vanerin palokammio koe standardin ISO 9705 mukaan. Syttymislähde propaanikaasupoltin näkyy vasemmassa alanurkassa. a) ennen koetta, b) 11 min sytytyksestä eli 1 min polttimen tehon nostamisesta 300 kW tasolle ja c) kokeen jälkeen, lattialla ovat pudonneiden kattolevyjen jäännökset.

4.4 SYTTYMISKOHTA

4.4.1 Yleistä

Syttymiskohdan jäädessä määrittämättä myös palon syy jää useimmiten selvittämättä. Syttymiskohdan ratkaisemiseksi joudutaan yhdistämään tietoa ainakin seuraavista seikoista:

- a) Tulipalon jättämät palojäljet
- b) Kuulustelujen ja haastattelujen antamat tiedot palosta ja paloa edeltävästä tilanteesta.
- c) Palofysiikkaan ja -kemian perustuva analyysi (mallitus) tunnettujen tai oletettujen palotapahtumien (tulipalon syttyminen ja kehittyminen) mahdollisuuksista aiheuttaa tiedossa olevia jälkiä.

Joskus voi löytyä yksityiskohta, kuten kiistaton fyysinen todistuskappale tai luotettavan silminnäkijän havainto, jonka perusteella syttymiskohta selviää. Useimmiten ei ole olemassa yksittäistä asiaa, joka sellaisenaan olisi riittävä selvittämään palonsyytä. Kaikki mahdolliset vaihtoehdot joudutaan käymään läpi ja kehittämään vastaavat palotilanteet, jotka sopivat käytettävissä olevaan tietoon. Jos näennäisesti järkevä tilanne ei sovi tietyn havainnon kanssa yhteen, on mietittävä onko vika skenaariossa vai havainnoissa. Joissakin tapauksissa syttymiskohdan kiinnittäminen on mahdotonta. Mahdollisten vaihtoehtojen luettelointi saattaa silti olla hyödyllistä. Luetteloon pitää silloin liittää täydellinen selvitys eri vaihtoehtoja puoltavista ja vastustavista seikoista.

Syttymiskohdan selvittämistyö tapahtuu usein syttymisen syyn selvittämisen rinnalla samanaikaisesti palopaikan raivauksen, valokuvaamisen ja näytteiden ottamisen kanssa. Palonsyyn selvittämisessä systemaattisuus on työn A ja O. Tutkimuksissa on hyvä seurata tiettyä rutiinia, jolloin voi keskittyä varsinaiseen selvittämistyöhön eikä seuraavan askeleen keksimiseen. Seuraavassa esitetään palon syyn selvittämisen oppaassa NFPA 921 Guide for Fire and Explosion Investigations (1995) suositeltu menetelmä. Siihen kuuluu alustava palopaikan tutkiminen, alustavan paloskenaarion luominen, palopaikan yksityiskohtainen tutkiminen, palopaikan raivaus, paloskenaarion arviointi ja syttymispaikan määrittäminen. Esityksen tarkoituksena on tukea palonsyyn tutkijaa, mutta ei rajoittaa häntä pelkästään tämän menetelmän käyttöön. Koska jokainen palo on erilainen, palotapahtumaa on lähestyttävä avoimella mielellä.

4.4.2 Palovaurioiden arviointi

Palon leviäminen ja sen aiheuttamat vauriot merkitään muistiin yksityiskohtaisesti. Kaikki asiaan kuuluvat havainnot tallennetaan palojälkien tyypistä, sijainnista, muodosta, mitatusta laajuudesta, materiaalista, johon jälki on jäänyt, jälkien tulkintaan. Palojäljet valokuvataan huolellisesti eri kulmista jäljen koon, muodon, aseman palopaikalla sekä niiden muihin jälkiin liittymisen

osoittamiseksi (kohdat 4.1 ja 4.2). Jos hiiltemissyvyyksiä on mitattu, tulokset merkitään vauriohavaintoihin, piirretään kuva ja hiiltemissyvyyssäyrät yhdistämällä samansyvyiset pisteet viivoilla ja tarpeen tullen interpoloimalla pisteiden välillä (kuva 4.2).

Lämmön ja liekkiien leviämistä kuvaavia nuolia voidaan merkitä piirroksiin havainnollistamaan tutkijan käsitystä palon kulusta (esimerkki kuvassa 3.6). Nuolilla voidaan myös kuvata erilaisia paloon kuuluvia tekijöitä, kuten lämpötiloja, lämpösäteilyvirran tiheyttä ja hiiltemissyvyyksiä. Jos nuolia käytetään kuvaamaan sekä faktoihin liittyviä havaintoja että tutkijan tulkintoja niistä, on selvästi osoitettava, kummasta on kysymys (eri värit, eri tyyppinen kirjoitus tms.).

4.4.3 Palopaikan alustava tutkiminen

Palopaikan alustava arviointi aloitetaan vähiten vaurioituneista alueista ja päädytään pahiten vaurioituneisiin alueisiin. Arviointiin kuuluvat rakennuksen ulko- ja sisäpuoliset sekä lähiympäristön alueet.

Alustavan tarkastelun tuloksena on arvio palopaikan turvallisuudesta, tarvittavasta henkilöstöstä ja työvälineistä sekä alueista rakennuksessa ja sen ulkopuolella. Ne on tutkittava yksityiskohtaisesti. Huolellisuus tässä työvaiheessa voi säästää paljon aikaa ja vaivaa tutkimuksen myöhemmissä vaiheissa.

Kaikkien kohtien sijainnit ilmoitetaan mahdollisimman tarkasti. Suunnat kiinnitetään ilmansuuntiin ja/tai hyvään kiintopisteeseen, esimerkiksi rakennuksen julkisivuun. Sijainnit ilmoitetaan niin selvästi, että jokainen raporttia myöhemmin lukeva henkilö pystyy yksikäsitteisesti hahmottamaan tilanteen. Huomattavat kohteet piirustuksissa ja kartoissa nimetään esimerkiksi kirjaintunnuksella tai kirjaimen ja numeron yhdistelmä-tunnuksella tai laajemmissa rakennuksissa, joista on jo olemassa piirustuksia, joko niiden ruudukkosymbolilla tai teollisuus-rakennuksissa eri kohteille annetuilla nimillä.

Palopaikan ympäristö sisällytetään tutkimukseen. Sieltä voi löytyä tärkeitä rakenteista erillään olevia palojälkiä, rakennukseen liittyviä esineitä tai muuta tutkimusta edistävää aineistoa. Jokainen mielenkiintoinen havainto ja sen kohde rakennuksessa kirjataan. Tämän vaiheen voi yhdistää silminnäkijöiden etsimiseen ja haastatteluun.

Sääolosuhteet

Palon aikaiset säätiedot merkitään muistiin, tarkat mitatut tiedot saadaan Ilmatieteen laitokselta. Sääolosuhteiden mahdollinen vaikutus paloon otetaan huomioon. Palopaikan ympäristössä ja ulkoseinillä voi olla tähän viittaavia jälkiä. Jos tarvitaan auringon asemaa esimerkiksi palon syttymissyyden selvittämiseksi, se voidaan kellonajan perusteella määrittää yksinkertaisella laskentakaavalla; tarvittaessa apua saa lähimmältä tähtitieteen laitokselta.

Rakennuksen ulkopuolinen tarkastelu

Kierros palaneen rakennuksen ympäri antaa yleiskuvan vaurioiden laajuudesta ja sijainnista sekä mahdollisesta rakennuksen ulkopuolella olevasta syttymissyystä. Kirjataan palopaikan rakenne ja käyttö. Rakenteeseen liittyvät rakennustapa, käytetyt rakennusmateriaalit, pintamateriaalit, suoritettut muutostyöt ja kaikki muut seikat, jotka voivat vaikuttaa palon syntyyn ja leviämiseen. Erityisesti otetaan huomioon vaurioiden laajuus rakennuksissa, jotka koostuvat eri aikoina rakennetuista osista. Jos eri osien rakennustapa ja -materiaalit eroavat huomattavasti toisistaan, vaurioiden laatu ja laajuus voivat myös vaihdella paljon rakennuksen eri osissa.

Selvitetään rakennuksen paloa edeltäneen hetken käyttö: minkälaista toimintaa rakennuksessa on ollut, missä ja milloin, siellä oleskelleiden henkilöiden lukumäärä ym. tiedot sekä alkuperäisen käyttötarkoituksen mahdollinen muuttuminen.

Rakennuksen sisäinen tarkistus

Tämän vaiheen ensisijainen tarkoitus on määrittää alueet, jotka vaativat yksityiskohtaisen tutkimisen. Kaikki mahdolliset syttymiskohdat, syttymislähteet, palojäljet ja palokuormat otetaan huomioon.

Rakennuksen jokainen huone ja tila käydään läpi. Kirjataan kunkin huoneen käyttötarkoitus, siellä olevat esineet, niiden sijainti, tila ja varastointitapa sekä asumisen tai muun käytön olosuhteet. Merkitään muistiin rakennustapa ja pinnoitemateriaalit, savu ja lämpöjäljet, palossa vaurioituneet alueet ja vaurioiden laajuus eri alueilla: voimakas, keskitaso, vähäinen, ei ollenkaan. Verrataan näitä havaintoja rakennuksen ulkopuolisiin vaurioihin. Tässä vaiheessa selvitetään myös rakennuksen yleistila ottaen huomioon työturvallisuuteen liittyvät seikat.

Läpikäynnin aikana tarkistetaan myös, onko palon jälkeisiä muutoksia tapahtunut, esimerkiksi palojäännösten tai muiden esineiden siirtämistä tai poistamista, muutoksia sähköjärjestelmässä esimerkiksi tilapäisen valaistuksen saamiseksi tai kaasuputkiston muutoksia. Tällaiset muutokset, jotka ovat joko tahattomia tai tarkoituksellisia, voivat vaikuttaa huomattavastikin palojälkien tulkintaan. Jos muutoksia havaitaan, muutoksen tehnyttä henkilöä tai henkilöitä haastatellaan mahdollisimman nopeasti töiden laajuudesta ja niiden dokumentoinnista.

4.4.4 Alustava paloskenaario

Mielenkiintoiset alueet tunnistetaan hahmottamalla alustava kuva palon leviämisestä rakennuksessa. Tämä tehdään ottamalla huomioon vaurioituneiden alueiden laajuus rakennuksen eri osissa ja arvioimalla palon syttymiskohtaa. Skenaarion avulla tutkija voi organisoida ja suunnitella tulevaa työtä. Tämä vaihe on kriittinen jatkoa ajatellen. On tärkeää, että tutkija ottaa myös muita mahdollisia kuvia huomioon, ja että nämä vaihtoehdot pidetään mielessä saman arvoisina tutkimuksen jatkuessa, kunnes havainnot tai niistä tehdyt johtopäätökset sulkevat ne pois. Skenaarioita mahdottomaksi tekevät väitteet on aina kirjattava tarkasti

ennen skenaarion hylkäämistä, jotta jälkikäteen ennen loppupäätelmiä ajatuksenkulkua voitaisiin tarkistaa.

Tutkimuksen alussa ei saa kiintyä yhteen teoriaan niin, että pyrkii löytämään vain sitä tukevia todisteita. Tutkimuksessa haetaan teorioiden luomiseksi kaikki olemassa olevat tosiasiat, jotka perustuvat palotieteen periaatteisiin. Työn aikana voi tulla esiin havaintoja ja tietoja, jotka muuttavat paloskenaariota monta kertaa ennen kuin lopullinen käsitys on muotoutunut. Tästä syystä ensimmäistä teoriaa palosta pidetään alustavana ja tutkimuksen aikana pidetään mieli avoimena.

Jatketaan tutkimalla mielenkiintoisten alueiden lämmitys-, ilmanvaihto- (koneellinen ja/tai luonnollinen), sähkönjakelu- ja paloturvallisuusjärjestelmiä, sähkö- ja muita laitteita. Näitä järjestelmiä ja laitteita tutkitaan myös palosta vaurioituneiden alueiden ulkopuolella, koska sieltäkin voi löytyä palonsyyn selvittämistä auttavaa tai vähintään laitteista ja materiaaleista saatavaa vertailutietoa.

4.4.5 Yksityiskohtainen palopaikan tutkiminen

4.4.5.1 ULKOPUOLINEN TUTKIMINEN

Alustavan arvion jälkeen siirrytään yksityiskohtaiseen tutkimiseen, jonka päämääränä on syytymiskohdan selvittäminen.

Lähtökohta on rakennuksen ulkopuolinen tutkimus. Vaikka palo on selvästi alkanut rakennuksen sisäpuolella, ulkopuoliset havainnot, valokuvat ja piirrookset auttavat rakenteiden hahmottamisessa, määrittämään palovaurioiden laajuutta ja saattavat paljastaa muuten näkymättömiä yksityiskohtia.

Paloa edeltävä tilanne

Paloa edeltävä tilanne selvitetään rakennuksen piirustuksista, suoritetuista korjaustöistä, palotarkastajan käynneistä ja -lausunnoista jne. Tarkistetaan perustuksen, hormien ja savupiippujen tila, sähkö- ja lämmitysjärjestelmän tyyppi, tila sekä kulutusmittareiden lukemat.

Ovet ja ikkunat

Tarkistetaan jokaisen oven tila, onko ovi auki vai kiinni, ehjä, rikkoutunut ja onko ovi murrettu. Selvitetään oven lukitusmekanismi ja sen tila. Jos ovi on murrettu, selvitetään, tapahtuiko se ennen paloa vai sen jälkeen. Joskus tämä selviää tarkastelemalla murtopintoja ja niissä olevia savu- ja nokijälkiä tai niiden puuttumisesta (savu ja noki kohta 4.1.8). Ikkunat tarkistetaan samalla tavoin (ikkunalasit kohta 4.1.9).

Räjähdyksjäljet

Jokainen ulkoisen pinnan siirtymä kirjataan. Siirtyneiden kappaleiden koko, siirtymän laajuus ja kauemmaksi lentäneiden osien sijainti rakennukseen nähden merkitään piirustuksiin. Siirtymien paljastamien pintojen hiiltyminen ja nokeentuminen merkitään myös piirustuksiin. Räjähdyksiä käsitellään laajemmin luvussa 9.

Palovauriot

Rakennuksen ulkopuoliset palovauriot kirjataan. Erityistä huomiota kiinnitetään sekä rakennukseen normaalisti kuuluviin aukkoihin että muihin aukkoihin. Rakennukseen kuuluvat aukot kuten ovet, ikkunat, tuuletus- ja muut hormit, joista palokaasut voivat kulkea, ja niiden lähiympäristö voivat antaa tietoa palon ja palotuotteiden kulusta. Muut asiaankuulumattomat aukot ovat palon, sammutustöiden tai murtautumisen aiheuttamia. Palon aiheuttamat aukot ovat osoituksena voimakkaasta palosta tai rakenteiden heikosta kohdasta. Erillään olevat palon aiheuttamat aukot voivat osoittaa useammasta syttymiskohdasta (mahdollinen tahallinen sytyttäminen), muutamaan kohtaan keskittyneestä palokuormasta tai palosta, joka on levinnyt siten, että on muodostunut useampi kuin yksi intensiivinen palorasitus rakenteen heikkoihin kohtiin.

Palokunnan tekemät aukot liittyvät yleensä sisäänmurtautumiseen tai palokaasujen tuuletukseen. Viimeksi mainitut aukot voivat vaikuttaa huomattavasti palotapahtumiin ja virtausolosuhteisiin kuten on tarkoituskin ja aiheuttaa siten oudolta vaikuttavia palojälkiä. Palonsyyn tutkijan on huolellisesti selvitettävä palokunnan kanssa sammutustöiden aikana tehdyt toimenpiteet ja otettava ne huomioon palojälkien tulkinnassa.

4.4.5.2 SISÄPUOLINEN TUTKIMINEN

Rakennus tutkitaan sisältä silloinkin, kun näyttää selvältä, että palo ei ole syttynyt sisältä, koska sieltä voi tehdä havaintoja suoraan syttymiskohtaan liittymättömistä paloilmioista. Sisätilat kirjataan valokuvin ja piirroksin. Tutkimus seuraa samoja päälinjoja kuin ulkopuolinen tutkimus.

Paloa edeltävä tilanne

Selvitetään paloa edeltävä tilanne, erityisesti tiloissa, joista palo on alkanut ja joissa se on kehittynyt. Ainakin seuraaviin seikkoihin on kiinnitettävä huomiota: yleiseen siisteyteen ja järjestykseen, helposti syttyvien aineiden kasautumiin (esim. roskat), onko sähkölaitteita käytetty oikein (ylikuormittuminen, väärät asennukset jne.), palohälyttimien olemassaoloon, samoin sammutusjärjestelmiin ja palo-oviin. Tarkistetaan, ovatko paloturvallisuusjärjestelmät toimintakunnossa ja toimivatko ne palon aikana, olivatko ne mahdollisesti poiskytkettynä. Tarkistetaan, onko rakennuksessa oleva palokuorma sellaista kuin olisi odotettavissa sentyyppisessä rakennuksessa ja miten se on vaikuttanut palon leviämiseen.

Pyritään selvittämään, missä määrin paloa edeltävä tilanne on vaikuttanut palon syntyyn ja sen kehitykseen.

Sähkö ja lämmitys

Selvitetään sähkö ja lämmitysjärjestelmien tyyppi, laatu ja vauriot. Jos lämmityksessä tai ruoanlaitossa on käytetty kaasua, tarkistetaan kaasuputkiston kunto ja mahdolliset vuotokohtat sekä arvioidaan ovatko vauriot syntyneet ennen paloa vaiko palon aikana. Sähköpaloja käsitellään kohdassa 5.3 ja kaasupaloja luvussa 8.

Räjähdykset

Seurataan ulkopuolisen tutkimuksen ohjetta. Yritetään selvittää räjähdysvaurioiden keskipiste. Selvitetään onko räjähdys tapahtunut ennen paloa vai palon aikana. Räjähdykset käsitellään yksityiskohtaisesti luvussa 9.

4.4.6 Palopaikan raivaus

Palopaikan raivausta voidaan verrata arkeologiseen kaivaukseen. Arkeologinen kaivaustyö pohjautuu kahteen perusasiaan: ensiksi, eri aikakausilta peräisin olevat kerrostumat muodostavat ajallisesti perättäisen luettelon, ja toiseksi, kerrostumien aukikaivamisen jälkeen niissä oleva ajallinen ja paikallinen informaatio häviää lopullisesti, ellei työn aikana pidetä kaivauksesta tarkkaa kirjaa (Cooke & Ide 1985).

Vastaavasti lattialle putoavat palojäännökset ja muu aines muodostavat kerroksia jotka vastaavat palon kehityksen eri hetkiä. Rakennuspalon aika-asteikko on minuutteja tai tunteja ja poikkeaa siinä arkeologiasta, että palojäännökset eivät ole siististi kerroksittain. Suuremmat osittain palaneet kappaleet saattavat olla hienojakoisemman palojäännöksen, kuten tuhkan, sulaneen muovin tai lasisirujen seassa. Tästä huolimatta nämä hajanaiset kerrostumat ja niissä olevien esineiden suhteelliset sijainnit voivat antaa tärkeää tietoa palon kehittymisestä.

On huomattava, että osa tästä todistusaineistosta voi hävitä, jos palojäännöksiä on siirretty joko sammutustöiden tai huolimattomasti tehdyn palonsyynselvityksen yhteydessä. Sammutustöiden aikana tehdyistä toimenpiteistä tehdään luettelo mahdollisimman varhaisessa vaiheessa.

Raivaustöiden tarkoituksena voi olla joku tai jotkut seuraavalta listalta (Cooke & Ide 1985):

- 1) Syttymiskohdan tai -kohtien paikallistaminen tai varmistaminen
- 2) Huoneen paloa edeltäneen tilan rekonstruointi
- 3) Paloa edeltäneiden tapahtumien selvittäminen
- 4) Ennen paloa paikalla olleiksi ilmoitettujen esineiden etsiminen

- 5) Paloa aiheuttavien esineiden etsiminen
- 6) Paloa kiihdyttävien aineiden etsiminen.
- 8) Palon kehittymisen selvittäminen

Kiinnitetään huomiota seikkoihin, jotka kertovat jotain paloa edeltävistä tapahtumista kuten murtovarkaan siirtämistä tavaroista, sammuttamisy yrityksistä (kattilat tai muut mahdollisesti vettä sisältäneet astiat, käsisammuttimet ym.), puuttuvista esineistä tai asiaan kuulumattomista esineistä, erityisesti tuhopolttoon viittaavista esineistä, kuten pulloista ja muista mahdollisesti nesteitä sisältäneistä astioista, tulitikuista ja muista sytytysvälineistä, ajastimista, johdoista, langoista ja paloa kiihdyttävistä aineista. Vertaa kohtaan 3.6 "Fyysiset todisteet, näytteiden ottaminen".

Raivaaminen

Ensimmäiseksi on selvitettävä, voiko rakennuksen raivattavassa osassa työskennellä turvallisesti. Rakennus on todennäköisesti vaurioitunut eniten syttymiskohdan läheltä. Lattia voi olla heikentynyt tai siinä voi olla reikiä, syttymiskohdan yläpuolella oleva katto voi sortua, samoin lähellä olevat seinät. Sähköiskun vaaran takia varmistetaan, että rakennuksen kaikki osat ovat jännitteettömiä. Selvitetään, onko tutkittavassa paikassa vaarallisia aineita.

Raivaus suoritetaan huolellisesti kerros kerrokselta. Edellä mainitussa alustavassa tutkimuksessa on rajattu raivattava alue. Raivaustyöstä tehdään piirroksia ja otetaan valokuvia. Rakennus- ym. piirustuksia hyödynnetään. Tehdään tila jonne palojäännökset voidaan siirtää, ja vältetään palojäännösten siirtämistä kahteen tai useampaan kertaan. Mahdollisuuksien mukaan käytetään rakennusta ja sen sisältöä tuntevan henkilön asiantuntemusta hyväksi.

Raivauksessa löydetyt esineet ja niiden sijainti, asento ja tila kirjataan. Esineet säilytetään tilapäisesti turvallisessa paikassa siihen asti kun on päätetty, mitkä esineet tarvitaan tarkempia tutkimuksia varten. Tärkeät löydöt merkitään heti, pakataan huolellisesti niin, että ne säilyvät löytöhetken tilassa, ja toimitetaan asianomaiseen paikkaan (vastaavalle tutkijalle). Vertaa kohta 3.6 "Fyysiset todisteet, näytteiden ottaminen".

4.4.7 Palopaikan ennallistaminen

Ennallistamalla palanut alue tai sen osa saatetaan paloa edeltävään tilaan. Tämä voidaan tehdä palojäännösten raivauksen ja dokumentoinnin jälkeen. Löydetyt esineet sijoitetaan alkuperäisiin paikkoihin ja niihin jääneet palojäljet tutkitaan. Tavallisesti esineet ovat jättäneet sijaintia osoittavan jäljen tai jälkiä, kuten pöydänjalkojen lattiaan jättämät pienet, vaaleat jäljet. Esineitä siirretään usein sammutustyön aikana, mutta nämä jäljet voivat helpottaa ennallistamista.

Tarkasta ennallistamisesta nähdään selvemmin palon jättämät jäljet ja niiden suhde paikalla oleviin esineisiin. Tämän avulla voidaan mahdollisesti paremmin

hahmottaa palon syttymiskohta. Ennallistuksen valokuvaaminen voi oleellisesti helpottaa asian esittämisen toisille henkilöille.

Ennallistamistyöhön ryhdyttäessä kannattaa selvittää huolellisesti, missä rakennuksen osissa tämä kannattaa tehdä rajaamalla todennäköinen syttymisalue mahdollisimman pieneksi. Ennallistaminen suoritetaan yleensä samanaikaisesti kuin raivaustyö.

Ennallistaminen edellyttää tietysti rakennuksesta ja sen sisällöstä riittävästi jäljelle jäänyttä ennallistettavaa.

Ennallistamisessa käytetään mahdollisimman paljon hyödyksi palokunnan tietoja rakennuksen ja sen osien kunnosta ja sisällöstä sammutustyön aikana. Tämä koskee erityisesti palokunnan siirtämiä esineitä ja niiden rakenteisiin kohdistunutta toimintaa. Rakennuksen omistajan ja/tai siellä olevien henkilöiden (yleensä asianomistajien) kertomukset ovat periaatteessa aina tarkoituksenmukaisia tai väritettyjä, joten niihin on suhtauduttava sopivan varauksellisesti tutkimusten alussa.

Ennallistamisen valmistelussa otetaan työturvallisuusnäkökohdat huomioon, sillä palojäännösten siirtäminen saattaa vaikuttaa rakenteiden kestävyYTEEN, johtaa sortumisiin tai paljastaa reikiä lattiassa, jännitteellisiä sähköjohtoja tai vaarallisia aineita.

Palon kehittymistä kuvaavia laskennallisia ennallistamismenetelmiä kuvataan kohdassa 6.3.1. Kokeellisia ennallistamisia, missä joko pienen osan tai koko palon todennäköistä kulkua jäljitellään, kuvataan kohdassa 6.3.2. Laskennallisilla ja kokeellisilla ennallistamisilla voidaan esimerkiksi selvittää, ovatko tietyt syttymismekanismit mahdollisia tai todennäköisiä, tai saada tietoa palon ajallisesta kehittymisestä.

4.4.8 Palotilanteen arviointi ja syttymiskohdan määrittäminen

Ulko- ja sisäpuolisen tarkastelun jälkeen palonsyyn tutkija luo havaintojen pohjalta kuvitteelliset palon leviämisen tilanteet. Mahdolliset ristiriidat kuvittelun tilanteen ja havaintojen välillä kirjataan ja selvitetään. Jos ristiriidat eivät selviä, tilanne arvioidaan uudestaan ristiriitojen vähentämiseksi tai otetaan käyttöön uusia kuviteltuja tilanteita.

Lopputuloksena arvioidaan, onko palon syttymiskohta määritettävissä käytettävissä olevan tiedon perusteella. Jos näin on, tutkitaan kaikki mahdolliset syttymissytyt tässä kohdassa ja sen läheisyydessä.

Jos syttymiskohta jää määrittämättä, palonsyyn selvittäminen vaikeutuu huomattavasti. Syttymiskohdan tunnistaminen saattaa jäädä kokonaan todistajan ilmoituksen varaan. Tutkimuksessa on silloin erittäin huolellisesti haettava seikkoja, jotka puhuvat todistajan ilmoituksen puolesta tai sitä vastaan.

4.5 KEMIAALLISET MENETELMÄT PALAVIEN NESTEIDEN TOTEAMISEKSI

4.5.1. Palavat nesteet

4.5.1.1 PALAVIEN NESTEIDEN LUOKITUS

Palavaksi nesteeksi luokiteltavien nesteiden leimahduslämpötila on enintään 100 °C. Palavaksi nesteeksi luokitellaan myös ne aineet, joiden leimahduslämpötila on yli 100 °C, mutta niitä käsitellään tai varastoidaan leimahduslämpötilaa korkeammassa lämpötilassa (Asetus vaarallisten kemikaalien teollisesta käsittelystä ja varastoinnista 682/90).

Palavien nesteiden luokitus muuttui 1.9.1990 voimaan tulleen kemikaaliasetuksen (620/90) myötä (taulukko 4.2). I luokan palavat nesteet jakaantuivat kahdeksi luokaksi: "erittäin helposti syttyvät" kemikaalit ja "helposti syttyvät" kemikaalit. II luokan palavat nesteet ovat nyt "syttyviä" kemikaaleja. Entiset III luokan palavat nesteet jäävät nykyisin luokituksen ulkopuolelle ja ovat "muita palavia aineita".

Taulukko 4.2. Palavien nesteiden vanha ja uusi luokitus.

Asetus palavista nesteistä (921/76) (kumottu 31.8.1990)			Kemikaaliasetus (620/90) (voimaan 1.9.1990)		
Luokka	Leimahdus- lämpötila (°C)	Merkintä	Luokka	Leimahdus- lämpötila (°C)	Merkintä
I luokan palava neste	< 21	F, R12	Erittäin helposti syttyvä kemikaali	< 0	F+, R12
		F, R11	Helposti syttyvä kemikaali	< 21	F, R11
II luokan palava neste	21 ... 55	F, R10	Syttyvä kemikaali	21 ... 55	R10
III luokan palava neste	55 ... 100	F	-	-	-

Kemikaaliasetuksessa 675/12.7.1993 on lueteltu erittäin helposti syttyvien, helposti syttyvien ja syttyvien nesteiden lisäksi myös vastaavaan luokitukseen kuuluvien jähmeiden ja kaasumaisten kemikaalien vaaraa osoittavat merkinnät eli R-lausekkeet. Asetuksessa on annettu erittäin helposti syttyville nesteille määritteeksi leimahduslämpötilan lisäksi kiehumislämpötila, jonka saa olla enintään 35 °C.

4.5.1.2 PALAVIEN NESTEIDEN KEMIALLINEN KOOSTUMUS

Suuri osa palavien nesteiden kaupallisista tuotteista on peräisin raakaöljystä. Tislaamalla ja jalostamalla raakaöljyä siitä saadaan erilaisia hiilivetyseoksia sisältäviä tuotteita. Palavat nesteet koostuvat siis pääasiassa hiilestä (C) ja vedystä (H), joiden palaessa syntyy hiilidioksidia (CO₂) ja vettä (H₂O), (vertaa kohtaan 2.1) eli luonnolle tyypillisiä aineita. Näinollen palojätteestä ei pidä etsiä palavien nesteiden palamistuotteita vaan näitä alkuperäisiä nesteitä sellaisenaan.

4.5.2 Kaupalliset tuotteet

Palavaksi nesteeksi luokiteltavien kaupallisten tuotteiden teollinen käsittely, kuljetus, myynti ja varastointi ovat tarkoin määritelty kemikaalilaissa (744/89) ja eri asetuksissa.

Palaviksi nesteiksi luokiteltavista kaupallisista tuotteista tulee valmistajan laatia käyttöturvallisuustiedote, josta ilmenevät tuotteen vaarallisuus ja palamisominaisuudet. Tiedotteesta voidaan selvittää mm. kemikaalin koostumus, sen kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet, stabiilisuus ja reaktiivisuus, käsittely ja varastointi ja vahingon sattuessa myös ensiapuohjeet.

Kaupallisissa tuotteissa hyödynnetään palavien nesteiden erityisominaisuuksia. Ne mm. palavat hyvin, haihtuvat helposti ja liuottavat tehokkaasti. Näin ollen samaa liuotinseosta voidaan käyttää esim. kolmeen kuluttajan mielestä hyvin erilaiseen tarkoitukseen: sytytysnesteeksi, pesuaineeksi ja maalien ohenteeksi. Sytytysnesteessä hyödynnetään nesteiden herkkää syttyvyyttä ja pesunesteissä niiden kykyä liuottaa rasvoja ja väriaineita. Lakkojen ja maalien komponenttien on pysyttävä liuottimen avulla liukoisena ja helposti levitettävänä. Toisaalta liuottimen on haihduttava pois, jotta maali tai lakka muodostaisi kovan pinnan.

4.5.2.1 PALAVIA NESTEITÄ SISÄLTÄVIÄ TUOTTEITA

1. Pääasiassa alkoholeja sisältävät tuotteet

- sprii (Sinol, Masinol) (etanoli)
- suuvedet, partavedet ja deodorantit (etanoli)
- tuulilasipesunesteet (isopropanoli)
- lennokkipolttoaineet (metanoli)
- dieselöljyn jäänestoaineet

2. Kevyet maaöljytisleet (C₄ - C₈)

- puhdistettu bensiini
- sytytinbensiini
- petrolieetteri

- kumi- ja verhoiluliimojen ohenteet
- käynnistyssumutteet (sprayt)
- ruiskuohenteet
- painovärin pesuaineet
- synteettiset ohenteet ja tinneri
- maalinpoistoaineet
- etoksietanoli (cellosolve)

3. Moottoribensiinit (C₈ - C₁₂) ja isoparafiinohenteet

4. Keskitisleet (C₈ - C₁₂) ja puutäpätit

- mineraalitäpätit
- puutäpätit
- lakkabensiinit
- maalien ohenteet
- kuivapesuaineet
- pesuainesprayt (esim. moottorinpesuaineet)
- bitumiliuokset
- korroosionsuoja-aineet
- autovahat
- sumupuhdistusvahat
- vahanpoistoaineet

5. Valopetrolit (C₉ - C₁₆), (polttoöljy nro 1)

- valopetrolit (lamppuöljyt)
- grillinsytytysnesteet
- lentopetroli
- lämmityspetroli
- hyönteissumutteet
- kosteudenpoistajat sprayt

6. Kaasuöljyt (C₁₀ - C₂₃), (polttoöljy nro 2)

- kevyt polttoöljy
- dieselpolttoneste
- konevaha- ja rasvanpoistoaineet

4.5.3 Näytteen esikäsittely

Näytteiden esikäsittely aloitetaan tarkistamalla, että näytepussi on ehjä ja mitä materiaalia näyte sisältää (puuta, kangasta, muovia, metallia jne.). Mikäli näytepussi on rikkoutunut, on mahdollista, että näytteessä olleet palavat nesteet ovat haihtuneet pois kuljetuksen ja säilytyksen aikana. Näytemateriaali taas vaikuttaa näytteen lämmitystapaan. Useimmiten näytepusseja lämmitetään mikroaaltouunissa, mutta näytteen sisältäessä metallia, muovia, kangasta tai ollessa huomattavan kuiva, näyte lämmitetään lämpökaapissa.

Palavien nesteiden kaasukromatografisessa analyysissä käytetään hyväksi näiden nesteiden höyrystymistä. Näytettä lämmitetään noin 100 °C:een, jolloin kaikki palavat nesteet sekä vesi höyrystyvät pussin sisälle.

Näytettä on tarkkailtava lämmitettäessä, koska se voi sisältää syttyviä tai räjähtäviä aineita tai kipinöintiä aiheuttavia metallinkappaleita. Toisaalta lämmitettäessä muodostuvat kaasut pyrkivät laajenemaan, jolloin näytepussi paisuu ja saattaa yllilämmitettynä haljeta. Näytepusseja on lämmitettäessä hyvä ravistella välillä tasaisen höyrystymisen varmistamiseksi.

Kaasunpitävällä ruiskulla nailonpussista otetaan 1 ml:n näyte pussissa olevaa kaasua, joka injektoidaan kaasukromatografiin. Lasinen ruisku on lämmitettävä 100 °C:een, jotta näyte pysyisi kaasuna injektoidessa. Nailonpussiin syntynyt reikä suljetaan erikoisteipillä kaasutiiviiksi, jolloin pussi voidaan lämmitää uudelleen.

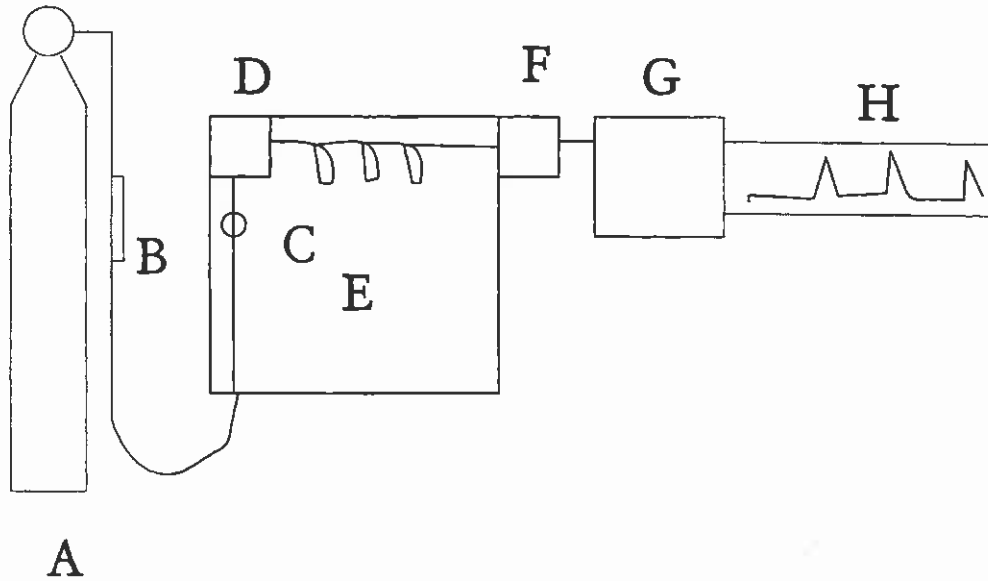
Nestenäytteestä erotetaan vesifaasi ja orgaaninen faasi. Orgaanisesta faasista injektoidaan kromatografiin noin 0,01 ... 0,1 µl. Jos näytteessä on eetteriin liukenematon nestefaasi, nestettä ravistellaan kolme kertaa erotussuppilossa pienellä määrällä eetteriä. Mikäli tutkittavan aineen pitoisuus eetterissä on vähäinen, eetteriä voidaan konsentroida pienenpään tilavuuteen.

Mikäli näyte kaasukromatografian perusteella sisältää raskaan maaöljytisleen (n-alkaanisarjan), se uutetaan eetterillä. Uutos konsentroidaan ja injektoidaan kaasukromatografiin.

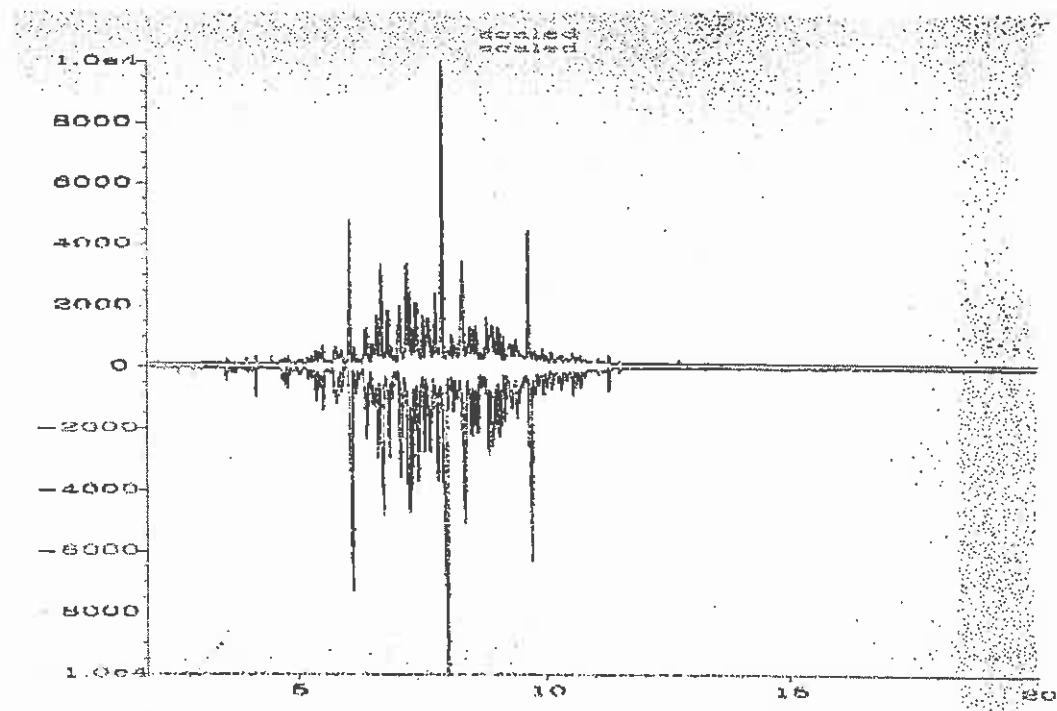
4.5.4 Kaasukromatografianalyysi

Kuumassa ruiskussa oleva kaasumainen näyte ruiskutetaan kaasukromatografian kuumentettuun injektoriin, josta se kulkeutuu kantokaasun avulla uunissa olevaan kolonniin. Näytekomponenttien erottelu tapahtuu kolonnissa, jossa stationäärifaasina toimii jähmeä aine ja liikkuvana faasina kaasu. Kun näytekomponentit saapuvat ilmaisimeen, ne ionisoituvat liekissä vaikuttaen ilmaisimen sähkönjohtokykyyn (kuva 4.19). Kaasukromatografiin liitetty tietokone rekisteröi muutokset ajan funktiona. Näin ollen kuvaajaksi saadaan kaasukromatogrammi, jossa x-akseli kuvaa yhdisteiden viipymää kaasukromatografissa eli retentioaikaa ja y-akseli yhdisteiden suhteellista pitoisuutta näytteessä. Esimerkki kaasukromatogrammista esitetään kuvassa 4.20.

Kaasukromatografien tarkempi toimintaperiaate selvitetään oppikirjan toisen osan luvussa 2.



Kuva 4.19. Kaasukromatografi A. Kaasusäiliö ja paineenalennusventtiili, B. Kaasunkuivausputki, C. Neulaventtiili, D. Injektiopesä, E. Uuni ja kolonni, F. Ilmaisin, H. Kromatogrammi.



Kuva 4.20. Kuvassa ylhäällä palojätenäytteestä saatu kaasukromatogrammi ja alhaalla (väärinpäin) mineraalitärpätin kaasukromatogrammi. X-akseli kuvaa yhdisteiden viipymää kaasukromatografissa eli retentioaikaa ja y-akseli yhdisteiden suhteellista pitoisuutta näytteessä.

Tulosten tarkastelu

Saatuja kaasukromatogrammeja vertaillaan tunnettujen yhdistekokonaisuuksien grammeihin ja selvitetään mahdollisen löydöksen kemiallista koostumusta. Mikäli kyseessä on maaöljypohjainen useampia komponentteja sisältävä tisle, tunnistus voidaan tehdä kaasukromatogrammin perusteella. Tällöin saatua kaasukromatogrammia verrataan kaupallisista tuotteista saatuihin kaasukromatogrammeihin.

Löydöstä vastaavan kaupallisen tuotteen selvittämiseksi on rikosteknisessä laboratoriossa noin 450 kaupallisen tuotteen vertailuainekokoelma. Vertailuaineet on analysoitu samalla menetelmällä kuin varsinaiset näytteet, joten saadut kromatogrammit ovat keskenään vertailukelpoiset. Grammeja vertailtaessa on otettava huomioon palon aiheuttamat muutokset (haihtuminen, palaminen jne.) palonäytteissä. Kaasukromatogrammeja voidaan vertailla tietokoneella, esim. piirtää samaan kuvaan ja tarkastella pieniäkin yksityiskohtia.

Kaupallisen tuotteen selvittämiseksi voidaan myös tietokoneohjelmalla hakea tietoja Valtion tietokonekeskuksen Vaarallisten kemikaalien käyttöturvallisuustietorekisteristä. Hakusanoina voidaan käyttää esim. koostumustietoja.

Mikäli näytteen todetaan sisältävän moottoribensiiniä tai yksittäisiä yhdisteitä esim. alkoholeja, tutkimuksia jatketaan massaspektrometrilla.

4.5.5 Massaspektrometrianalyysi

Palonäytteiden tutkimiseen käytettävässä massaspektrometrissä näytteen komponentit erotellaan kaasukromatografilla. Erottuneet yhdisteet johdetaan kaasukromatografian kolonnista suoraan massaspektrometrin ionisaatiokammioon, jossa ne ionisoidaan elektronisuihkulla. Kvadrupolilinssin läpi lentäessään tietyn massaiset ionit ohjautuvat ilmaisimelle. Kvadrupolilinssin voimakkuutta voidaan ohjata nopeasti sähköisesti. Siten koko massa-alueen yli voidaan pyyhkäistä nopeasti monia kertoja mittausjakson aikana, jolloin erimassaisten yhdisteiden määriä voidaan vertailla keskenään. Tarkempi massaspektrometrin toiminta-periaate esitetään oppikirjan toisen osan luvussa 2.

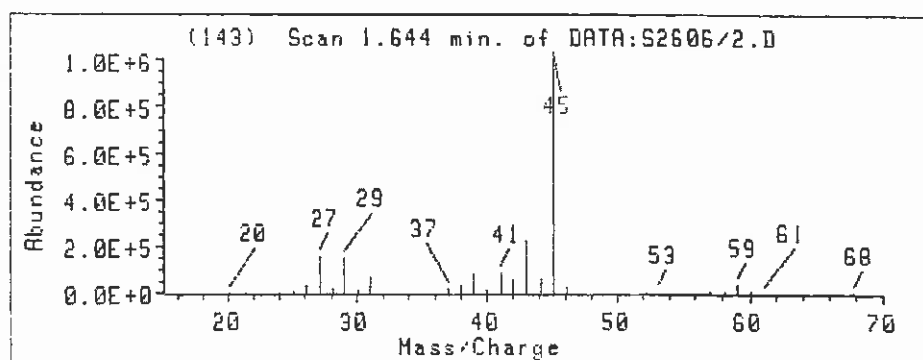
Näytteiden valmistus suoritetaan samoin kuin kaasukromatografisessa menetelmässä.

Mikäli näytteen epäillään sisältävän kaasukromatogrammin perusteella moottoribensiiniä, näyte analysoidaan kaasukromatografiin liitetyllä massaspektrometrilla (MS) käyttämällä SIM-tekniikkaa (Selected Ion Monitoring). Seurattavat ionit ovat massaluvultaan tällöin 43 amu, 57 amu, 91 amu, 104 amu, 105 amu, 119 amu, 128 amu, 142 amu ja 237 amu (amu on atomimassayksikkö). Nämä ovat moottoribensiinin komponenttien molekyyli-fragmentteja. SIM-tekniikkaa käyttämällä mahdollinen taustan aiheuttama häiriö saadaan vähenemään ja siten myös lisää herkkyyttä.

Bensiinimäärittysten tulostukseen käytetään tietokoneohjelmaa, joka tulostaa tutkitun näytteen kokonaisionikromatogrammin (TIC, Total Ion Chromatogram) ja yhdeksän ionikromatogrammia verrattuna vertailumoottoribensiinistä saatuihin vastaaviin grammeihin normitettuina sekä normittamattoman näytteen kokonais-ionikromatogrammin.

Yksittäisten yhdisteiden tunnistamisessa seurataan ioniväliä 19 - 300 amu. Tutkittavista yhdisteistä saatuja massaspektrejä verrataan kirjastospektreihin. Yhdisteen tunnistamiseksi edellytetään yhtenevää retentioaikaa ja massaspektriä vertailuaineen kanssa. Kun näytteen kemiallinen koostumus on varmistettu, vastaava kaupallinen tuote pyritään löytämään.

Esimerkki massaspektristä esitetään kuvassa 4.21.



Kuva 4.21. Isopropanolin massaspektri. X-akseli kuvaa ionien massalukua (amu) ja y-akseli intensiteettiä.

4.5.6 Trap-TD-GC-MS-menetelmä

Trap-termodesorptio-kaasukromatografia-massaspektrometria-menetelmää käytetään, kun kaasukromatogrammin perusteella näytteen epäillään sisältävän moottoribensiiniä tai muuta palavaa nestettä, jota ei voida tunnistaa kaasukromatogrammin perusteella eikä näytteen pitoisuus ole riittävä normaalille massaspektrometrille menetelmälle (GC-MS).

Menetelmän herkkyuden parantaminen perustuu kylmäloukkutekniikkaan. Näyte lämmitetään edellä esitetyllä tavalla, jolloin palavat nesteet ja vesi höyrystyvät pussin sisälle. Näytepussista imetään kaasuuntunut palava neste Tenax-massalla täytettyyn lasiputkeen eli trappiin. Käytännössä se tapahtuu yhdistämällä näytepussin läpäisevä injektioneula letkun avulla trappiin, jonka toiseen päähän on liitetty sähköpumppu. Trappi asetetaan termodesorptiolaitteiston uuniin. Sieltä näyte desorboidaan ensimmäiseen nestetypellä jäähdytettyyn kylmäloukkuun. Ennen kaasukromatografiin injektioitumista näyte siirretään vielä toiseen

kylmäloukkuun, josta se injektoituu kapeana vyöhykkeenä suoraan kaasukromatografian kolonniin.

Näytteen jatkoanalysointi tapahtuu edellä esitetyn massaspektrometrin menetelmän mukaisesti.

Kohtaan 4.5 liittyvää kirjallisuutta: Asetus vaarallisten kemikaalien teollisesta käsittelystä ja varastoinnista (682/90), Cooke ja Ide (1985), Durand, Boscher ja Petroff (1987), Kelly ja Martz (1984), Kemikaalilaki (744/89), Kemikaaliasetus (620/90), Kuivalainen ja Lähde (1997), Kärkkäinen, Seppälä ja Himberg (1994), Rizzi (1991), Smith (1982), Smith (1983), Tebbett (1992 s. 109-147), Työpaikan kemikaalilainsäädäntö (1994).

5. SYTTYMISSYYN TUTKIMINEN

5.1 YLEISTÄ

5.1.1 Johdanto

Syttymissyyn tutkimuksessa tarvitaan tietoa niistä olosuhteista ja tekijöistä, jotka ovat välttämättömiä palon syttymiseksi. Tällaisia ovat mm. syttymiseen liittyvä laite tai väline, riittävä syttymislähde, ensimmäiseksi syttyneen aineen laatu ja muoto sekä olosuhteet tai (inhimillinen) toiminta, joka yhdisti nämä tekijät siten että tulipalo syttyi. Muutkin kuin mainitut seikat saattavat tulla kysymykseen.

Esimerkiksi otetaan seuraava yksinkertainen tilanne: Tulipalo on alkanut vaatekomerossa, jossa hehkulamppu on ollut liian lähellä vaatekappaletta ja sytyttänyt sen. Tapaukseen liittyvät seikat ovat:

- liian lähellä vaatehyllyä oleva hehkulamppu
- hyllylle on pinottu liikaa palavaa tavaraa liian lähelle lamppua
- lamppu on ollut päällä silloin, kun kukaan ei käynyt komerossa.

Tutkimuksissa selvitetään nämä seikat ja niiden vaikutus tulipalon syntyyn ja kehitykseen.

5.1.2 Syttymislähde

Syttymisenergian lähde on useimmiten syttymiskohdan lähellä, vaikka joskus tilanne ei ensinäkemältä siltä vaikuttaisikaan. Energialähde saattaa säilyä joskus tunnistettavassa muodossa syttymiskohdan lähellä, joskus sen ulkomuoto on muuttunut tai se on kokonaan hävinnyt. Syttymislähde on kuitenkin löydettävä ja tunnistettava, jotta syttymisen syy selviäisi. Joskus syttymislähde voidaan tunnistaa vain päätelemällä, ja silloin ilmoitetaan eri mahdollisuuksista todennäköisin.

Syttymisprosessiin liittyy energian tuottaminen, energiansiirto ympäristöön ja ympäristössä olevan polttoaineen lämmittäminen syttymiseen asti.

Energialähteen on kyettävä tuottamaan ja siirtämään riittävästi energiaa ympärillä olevaan polttoaineeseen sen sytyttämiseksi.

Energia siirtyy johtumalla, kuljettumalla tai säteilemällä. Johtumalla energia siirtyy, kun polttoaine koskettaa suoraan energialähdettä, esimerkiksi ylikuormitetun sähköjohdon eriste, joka koskettaa johdinta. Jos energialähde on erillään polttoaineesta, energiansiirto voi tapahtua joko kuljettumalla, säteilemällä tai niiden yhdistelmällä. Kuljettumalla energia siirtyy fluidin, nesteen tai kaasun välityksellä, pahimmillaan kemiallisen ja lämpöenergian yhdistelmänä esimerkiksi palavina kaasuina. Säteily voi olla peräisin kuumien esineiden pinnasta, liekeistä tai

kuumasta kaasukerroksesta. Lämmönsiirrosta tulipaloissa on kerrottu kohdassa 2.2.3, ja hyvä katsaus siitä on Drysdalen (1985) kirjassa.

Kun energiaa siirtyy polttoaineeseen, sen lämpötila nousee. Eri polttoaineet reagoivat eri tavalla niihin kohdistuvaan energiaan. Osa energiasta heijastuu pois niiden pinnasta, osa siirtyy aineeseen, jossa se nostaa kappaleen lämpötilaa ja kulkeutuu viileämpään ympäristöön. Energian siirtoa jähmeään aineeseen syttymisessä on käsitelty tarkemmin kohdassa 2.2.1.3.

Kohdasta 2.2.1.3 nähdään, että kappaleeseen ulkopuolelta energiaa tuotaessa pinnan lämpötilan nousua säätelee lämpötunkeutumiskerroin, joka on pieni kevyillä aineilla (solumuovit ja muut kevyet lämmöneristeet), keskinkertainen monilla jähmeillä rakennusmateriaaleilla (puutuotteet, betonituotteet) ja hyvin suuri metalleilla (teräs). Jos tietty energiamäärä kohdistuu sekä aineeseen, jonka lämpötunkeutumiskerroin b on alhainen (esimerkiksi polyuretaanivaaho $b \approx 35 \text{ W s}^{1/2}/\text{m}^2 \text{ K}$), että aineeseen, jonka b on suuri (esimerkiksi puupaneeli $b \approx 350 \text{ W s}^{1/2}/\text{m}^2 \text{ K}$), niin alhaisemman lämpötunkeutumiskertoimen aineen pintalämpötila nousee paljon nopeammin (vrt. Drysdale 1985, kuva 2.10).

Syttymisalueen tai syttymiskohdan määrittämisen jälkeen on tunnistettava energianlähde, laite, aine tai tilanne, joka on voinut aiheuttaa syttymisen. Lämpöä tuottavia laitteita ovat esimerkiksi kiinteät ja siirrettävät lämmittimet, kaasui- tai sähkökäyttöiset laitteet, uunit, vedenlämmittimet, puuhellat, lamput, polttomoottorit ja vaatekuivurit.

Vialliset laitteet ovat myös mahdollisia energian lähteitä, joita yllä mainittujen lisäksi ovat kaikenlaiset sähkölaitteet, moottorit, muuntajat ja sähkökäyttöiset koneet.

Palavien kaasujen mahdollisia syttymislähteitä ovat mm. sähkömoottoreiden hiiliharjojen aiheuttamat kipinät, sähkökatkaisimien kipinät, kaasulaitteiden liekit, oikosulkukipinät ja tulityöt.

Palavat kaasut tai nestehöyryt voivat kulkeutua pitkiä matkoja ennen kuin osuvat syttymislähteeseen. Syttyminen edellyttää tiettyjä olosuhteita, kuten kaasui-ilmaseoksen pitoisuutta syttymisrajojen välillä (vrt. kohta 2.2.1) ja riittävää energialähdettä (minimisyttymisenergia, vrt. kohta 2.2.1.1) on palamiskykyisessä seoksessa. Kaasujen tapauksessa etäisyys polttoainelähteen ja syttymiskohdan välillä saattaa olla huomattava ja aiheuttaa hämmennystä.

Palaneen tilan omistajilta, vuokraajilta, käyttäjiltä ja asukkailta hankitaan tietoa syttymiskohdan lähellä olevista mahdollisista energialähteistä, miten ja milloin niitä on käytetty. Näiden tietojen hankkiminen on erityisen tärkeää silloin kun syttymislähde häviää tulipalossa, syttymislähde on pieni tai syttymislähde jää muuten helposti huomaamatta.

5.1.3 Ensiksi syttyvä aine

Syttymislähteestä energia siirtyy sitä lähellä olevaan aineeseen ja sytyttää sen. Aineen fysikaalinen olomuoto vaikuttaa oleellisesti syttymisherkkyteen. Jähmeä aine, jonka pinta-ala - massa -suhde on suuri, kuten pöly, kuitu tai paperi, syttyy helpommin kuin aine jonka pinta-ala - massa -suhde on pieni. Mitä suurempi ensiksi syttyvän aineen pinta-ala - massa -suhde on, sitä matalampi on siis syttymiseen tarvittava energiataso.

Kaasut ja höyryt voivat syttyä välittömästi hyvin pienestä energiamäärästä, aineen ja olosuhteiden mukaan 1 ... 100 mJ. Niiden sytyttämiseen tarvittavasta minimi-syttymisenergiasta on keskusteltu kohdassa 2.2.1.1. Pölyt syttyvät kaasujen ja höyryjen tavoin, kun hiukkasten läpimitta on alle 60 µm. Palava neste syttyy samalla mekanismilla kuin höyry, jos nesteen lämpötila on leimahduslämpötilan yläpuolella, jolloin nesteen pinnan välittömässä läheisyydessä on syttyvä höyryseos (vrt. kuva 2.9). Jähmeän aineen sytyttämiseen tarvitaan suurempi energiamäärä, joka riippuu sytytettävän aineen koosta ja materiaalista. Sytytysmekanismia on käsitelty kohdassa 2.2.1.3.

Ensiksi syttyvä aine voi olla syttymislähteen osa, esimerkiksi ylikuumentuneen kahvinkeitin muovinen kuori, tai syttymislähteen välittömässä läheisyydessä, esimerkiksi kuumen keittolevyn päällä oleva pyyhe.

Ensiksi syttynyt aine voi olla kaasu tai höyry. Silloin voi käydä niin, että kaasun syttymiskohta ja rakennuksen tai sen sisustuksen varsinaisen palon alkamiskohta ovat eri paikoissa. Jos syttyminen aiheuttaa räjähdysten, sen polttoaineena on yleensä kaasu, höyry tai pöly.

Ensiksi syttyneen aineen tunnistaminen on tärkeää palon syttymismekanismien ymmärtämiseksi. On pidettävä mielessä, että aineella täytyy olla sellaiset ominaisuudet, että se syttyy energialähteen asettamissa rajoissa. Esimerkiksi otetaan tulitikkun jäännökset massiivisella puupöydän palaneella pinnalla. On käytännössä varmaa, ettei palava tulitikku sellaisenaan sytytä pöydän pintaa. Se on myös voinut sammua tai voitu sammuttaa ja heittää pöydälle ennen paloa. Sen sijaan tulitikku on voinut sytyttää pöydällä olevaa paperia tai muuta kevyempää polttoainetta, josta palo on voinut levitä muualle.

5.1.4 Sytymissy

Syttymislähde tai polttoaine yksinään ei pysty sytyttämään tulipaloa, vaan näiden yhdistelmä johtaa tulipaloon. Pelkän polttoaineen tai mahdollisen syttymislähteen olemassaolon perusteella ei voida tehdä varmoja johtopäätöksiä tulipalon sytymissyystä, vaan syttymiseen liittyvä tapahtumasarja on selvitettävä.

Selvitetään, mitkä olosuhteet ja tapahtumat ovat voineet esiintyä syttymis-tapahtumassa ja missä aikajärjestyksessä. Käydään läpi kaikki mahdolliset tapahtumasarjat ja otetaan nämä huomioon syttymistä selvittävässä lopullisessa ratkaisussa. Esimerkiksi rasvakattilan syttymisestä voidaan sanoa enemmän kuin pelkkä "rasvakattila syttynyt ylikuumenemisestä". Lisäksi voidaan selvittää,

minkä takia kattila kuumeni liikaa, oliko rasva sopivaa käyttötarkoitukseen, oliko lämmitin oikein säädetty, ylikuumentumissuoja kunnossa jne.

Tutkimuksissa ei saa poistaa tiettyä syytä mahdollisten joukosta pelkästään sen perusteella, ettei siitä ole ilmeistä osoitusta, esimerkiksi kun sähkölämmittimestä ei löydy kipinöimisen tai ylikuumentumisen jälkiä. Mahdollisuuden voi poistaa epäiltyjen joukosta vasta sen jälkeen, kun voidaan osoittaa, ettei se ole mahdollinen syytymissyy; esimerkiksi sähkölämmittintä ei ollut kytketty sähköverkkoon palon syytymishetkellä.

5.1.5 Lausuntojen luotettavuus

Tulipaloihin tai räjähdyksiin liittyvien lausuntojen luotettavuutta pitäisi pystyä jollakin tavalla arvioimaan. NFPA 921 (1995) jakaa lausuntojen luotettavuuden neljään ryhmään:

a) Loppuun viety päättely. Lausunto perustuu niin huolelliseen tosiasioihin perustuvaan päättelyyn, ettei sitä voi asettaa kyseenalaiseksi. Lausunnon väittämien kaikki mahdolliset vaihtoehdot on otettu huomioon ja osoitettu, että vaihtoehdot eivät kestä kritiikkiä.

b) Todennäköisesti tosi. Lausunto on suuremmalla todennäköisyydellä tosi kuin epätosi.

c) Mahdollisesti tosi. Lausunnon väittämä voidaan osoittaa uskottavaksi, mutta muut vaihtoehdot saattavat olla yhtä tai lähes yhtä mahdollisia.

d) Epäillään todeksi. Tutkijan käsityksen mukaan lausunnon väittämä saattaa olla tosi, mutta ei ole riittävästi tietoa muiden yhtä mahdollisten vaihtoehtojen poissulkemiseksi.

Palonsyyn tutkija vastaa viime kädessä lausunnon luotettavuudesta. Tieteellisesti pätevästi perustellun lausunnon tulisi kuulua joko ryhmään a) tai b). Mikäli päädytään ryhmään c) tai d), tutkimustuloksena pitäisi ilmoittaa, ettei palonsyytä ole voitu määrittää.

5.2 LÄMMITTÄMINEN, RUOANLAITTO JA VALAISTUS

5.2.1 Lämmittäminen

Lämmityslaitteiden aiheuttamat ongelmatilanteet riippuvat lämmitykseen käytetystä polttoaineesta. Kaikilla on yhteisenä piirteenä, että väärin asennettuna laite voi kuumentaa ja sytyttää ympäristönsä joko suoraan koskettamalla tai kuljettumis- tai säteilymekanismin. Vaikka lämmityslaitte olisi oikein asennettu, liian lähelle tuodut palavat aineet, tekstiilit ym. voivat syttyä joko suoraan koskettamalla laitteen kuumaa osaa tai epäsuorasti aiheuttamalla laitteen ylikuumentumisen.

Vaurioituneesta laitteesta, jossa on halkeamia tai jonka tulipesän luukut on jätetty auki, palavaa polttoainetta tai kipinöitä voi pudota tai valua ympäristöön ja sytyttää palon. Puulämmitteisten laitteiden kuuma tuhka ja kuona tyhjennettynä laitteen tuhka-astiasta palavasta materiaalista tehtyyn astiaan on aiheuttanut monta tulipaloa.

Väärän polttoaineen käyttö tai väärä sytytystapa ovat myös huomattavia palonsyitä. Esimerkkinä voidaan mainita puulämmityslaitteiden sytyttäminen sytytysnesteillä tai vielä pahemmin bensiinillä, mikä nesteen höyrystymisen jälkeen voi johtaa räjähdykseen ja palon hyvin nopeaan leviämiseen.

Maa- ja nestekaasulämmityslaitteissa vaarana on kaasuvuoto, jonka sytyttämiseksi lämmityslaitteena käytetty kuuma säteilijäkin on lähes aina riittävä. Kaasuvuodosta voi seurata räjähdys. Nestekaasulaite on vaaratekijä mahdollisen nestekaasuräjähdyksen tai -vuodon vuoksi silloinkin kun tulipalo on syttynyt muusta syystä. Jos nestekaasupullon venttiili on auki, siitä tuleva palava nestekaasusuihku voi levittää paloa ja aiheuttaa väärään tulkintaan johtavia palojälkiä.

Lämmityspetrolikamiinan kaatuminen saattaa johtaa polttoaineen valumiseen ja syttymiseen. Öljylämmityslaitteiden öljyvuodot ovat myös mahdollinen palovaaran aiheuttaja. Molemmissa laitteissa voi polttimeen kerääntynyt noki, pöly tai muu lika syttyä ja johtaa tulipaloon.

Sähkölämmittimet voivat kuumentua peittämisestä ja aiheuttaa tulipalon. Jos lämmitin on kaatunut tai kaadettu nurin siten, että säteilypinta on lattiaan päin, tämä voi syttyä. Tästä jää useimmiten huomattavia vaurioita lattiaan rajoitetulle alueelle.

Kuumailmapuhaltimet, missä kuumentava sähkövastus sijaitsee puhaltimen ilmapirrassa, voivat ylikuumentua lämmittimen läpivirtauksen osittain estyessä siten, että ylikuumenemissuoja ei toimi. Puhaltimen aiheuttama imu voi vetää lämmittimeen paperia ja roskia, jotka kuuma hehkulanka sytyttää.

Kaikissa tapauksissa edellytetään tietysti laitteen olleen käytössä. Jos laite on ollut käytössä, selvitetään kuinka kauan ja millä polttoaineella. Kaikkien säätöjen, luukkujen ja peltien asennot on kirjattava ja valokuvattava. Muuttuneiden sääolosuhteiden osuus voi olla tärkeä, esimerkiksi lämmitys ensimmäistä kertaa syksyllä tai erityisen voimakas lämmitys kylmänä päivänä.

5.2.2 Savuhormit

Jos lämmityslaite on kytketty savuhormiin, seuraavia tulipalotilanteita saattaa esiintyä:

1) Hormi on ollut liian lähellä palava-aineisia rakennusosia, jotka ovat syttyneet. Suomen rakentamismääräyskokoelma E3 Pienet savuhormit (1988) määrittelee vaaditut suojaetäisyydet ja antaa ohjeet savuhormien suunnittelusta, mitoituksesta ja kelpoisuuden toteamisesta.

2) Hormissa on ollut halkeamia, reikiä tai heikkoja liitoskohtia, joiden kautta kuumat kaasut, liekit tai kipinät ovat levinneet ympäristöön ja sytyttäneet siellä olevaa palavaa ainetta. Hormin tiiviys voidaan tarkistaa silmämääräisesti tai savukokeella.

3) Hormin suusta lentäneet kipinät ovat sytyttäneet katon tai muun ympäristön kohteen.

4) Hormin seinämiin jäänyt noki, terva, öljy, pöly, lika jne. on syttynyt palamaan ja tulipalo on levinnyt jonkun tilanteiden 1 - 3 mukaisen mekanismin välityksellä.

Jos lämmityslaitteen hormia epäillään palon syyksi, tuoreimmat palotarkastus- ja nuohoustoimenpiteet ja niiden yhteydessä tehdyt huomautukset ja havainnot on selvitettävä.

5.2.3 Ruoanlaitto

Ruoanlaittoon liittyvillä paloilla on usein silminnäkijöitä, ne voidaan useimmiten paikallistaa keittiöön ja niiden syttymishetki on usein ennen ruoka-aikaa. Näistä syistä ruoanlaittoon liittyvät palot ovat usein helposti tunnistettavissa.

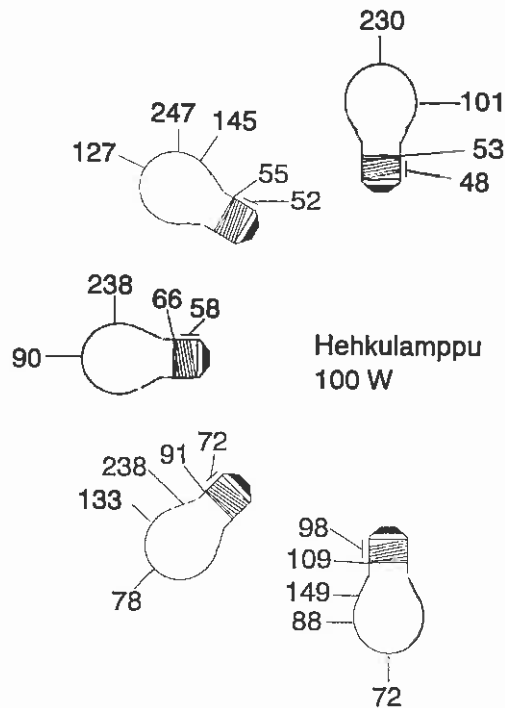
Rasvakattilat ovat tavallinen syttymissy. Jos rasvapannu jätetään oman onnensa nojaan kuumalle lämmityslaitteelle, rasvan lämpötila voi nopeasti nousta tavanomaisesta keittolämpötilasta noin 200 °C sen itsesyttymislämpötilaan (310 ... 360 °C). Punahehkuiselle sähköiselle lämmityselementille (vähintään 550 °C) tippuva rasva tai öljy syttyy tavallisesti.

Tulipalo saa myös usein alkunsa kuumen keittolevyn päällä tai vieressä olevista pyyhkeistä, verhoista tai muista esineistä.

Englantilaisten tilastojen mukaan sähkölieden paloriski on noin 3 kertaa niin suuri kuin kaasulieden (Hogg 1963). Saman tutkimuksen mukaan ruoanlaitosta johtuvista paloista yli 95 % johtui laitteen väärästä käytöstä ja loput laitevioista. Valtaosa väärinkäyttötapauksista liittyi lämmitettävän tai keitettävän aineen syttymiseen. Sähkökeittimien suurempaa paloriskiä on selitetty rakenteellisilla eroilla. Jos rasva kiehuu yli sähköliedellä, se putoaa suoraan kuumalle pinnalle, mutta kaasuliedellä on mahdollista rasvan pudota palavan kaasurenkaan läpi syttymättä. Toisena syynä mainitaan, ettei sähkölieteen liity melko helposti havaittavaa liekkiä tai kaasusuihkun ääntä, jolloin se unohtuu helpommin päälle.

5.2.4 Valaistus

Tavanomaisin sisätilojen valaistusväline on **hehkulamppu**, missä ohutta volframilankaa hehkutetaan sähkövirralla lasikuvussa inertissä kaasukehässä. Hehkulampun kuvun pintalämpötila on normaalisti välillä 70 ... 300 °C lampun tehosta ja asennosta riippuen (kuva 5.1), mutta lämpötila voi nousta paljon korkeammallekin, jos kupu lämpöeristetään. Tällainen eristystilanne syntyy, jos hehkulamppuvalaisin kaatuu tai putoaa hyvin lämpöä eristävälle pinnalle kuten matolle, sängylle tai vaatteiden päälle.



Kuva 5.1. Hehkulampun kuvun pinnan lämpötiloja lampun eri asennoissa. Lämpötilat on ilmoitettu Celsius-asteissa (A pocket guide to arson and fire investigation, 1994).

Hehkulampun kuvun pintalämpötila sellaisenaan ei yleensä riitä sytyttämään selluloosapitoisia materiaaleja. Pienet paperi- tai tekstiilipalat voivat kärventyä koskettaessaan lasikupua mutta syttyvät harvoin. Suuremmat paperin- tai tekstiilipalat voivat sen sijaan estää lämmönsiirtoa lampusta, nostaa lasikuvun lämpötilaa ja syttyä palamaan.

Epäiltäessä hehkulampun sytyttäneen palon yksinkertaisella rekonstruktiokelellä voidaan osoittaa, oliko palon mahdollista syttyä niissä olosuhteissa.

Jos hehkulampun kupu rikkoutuu, hehkulanka hehkuu muutaman sekunnin ja hapettuu ilmassa valkoiseksi tai keltaiseksi volframoksidiksi. Hehkumisajan aikana kuuma hehkulanka voi sytyttää siihen koskettavan palavan aineen.

Cooke ja Ide (1985) mainitsevat erityisesti liikenneonnettomuudet, missä rikkinäisen lampun hehkulanka saattaa sytyttää bensiinivuodosta tulevan höyryn.

Loistevaloputket eivät lämpimiä kovinkaan paljon, ja putken lämpötila ylittää tuskin 60 °C paitsi katodin lähellä, missä lämpötila voi nousta 80 °C:een (Cooke ja Ide 1985). Sytytyspiirin kuristimet voivat kuumentua liikaa, ja on arveltu tulipaloja syntyneen tästä syystä. Tämän osoittaminen pelkästään jäljelle jääneestä palaneesta piiristä voi olla hankalaa.

Volframihalogeenilamppujen lasikupu tehdään kvartsilasista, joka kestää lampun korkean lämpötilan, joka kuvussa voi nousta 600 - 900 °C:een (Cooke &

Ide 1985). Tällaisen kvartsikuvun kanssa kosketuksessa olevat palavat aineet syttyvät todennäköisesti lyhyessä ajassa. Joissakin halogeenilamppujen kuvuissa on korkeahko sisäinen paine, ja nämä saattavat räjähtää tietyissä olosuhteissa.

Vaikka lähes kaikki nykyajan valaisimet toimivat sähköllä, **avoliekkivalaistusta** käytetään esimerkiksi tunnelmavalona joulunaikaan. Huolimattomasti käytettyinä erilaiset kynttilät ja lämpökynttilät aiheuttavat joka vuosi tulipaloja, kun kynttilä on jätetty liian lähelle palavaa ainetta tai sen päälle, epäsopivaan kynttiläjalkaan tai sen korvikkeeseen jne. Lämpökynttilät ja erilaiset lämpökynttilöitä käyttävät kynttilälyhdyt ovat osoittautuneet erityisen vaarallisiksi. Yksittäisen lämpökynttilän sydänlanka voi kaatua tai siihen voi esim. pudonneesta tulitikun karresta tai muusta roskasta syntyä ylimääräinen sydän, jolloin kynttilä alkaa palaa niin voimakkaalla liekillä, että metallikupissa oleva sula neste syttyy palamaan lammikkona. Silloin kuppi kuumenee niin voimakkaasti, että lähellä tai kupin alla olevat materiaalit saattavat syttyä palamaan. Kynttilälyhdyt voivat ylikuumentua tai rikkoutua samanlaisen tapahtumaketjun vaikutuksesta ja sytyttää lähellä tai alapuolella olevia kohteita. Steariinin tai parafiinin jälkiä löydettyessä kynttilä on otettava huomioon palon sytyttäjänä.

5.3 SÄHKÖTEKNISET SYYT

5.3.1 Yleistä

Sähköiset palon syttymissyöt kattavat palotilastoista huomattavan osan. Vuonna 1992 oli lähes kolmannes Suomessa sattuneista palovahingoista lukumääräisesti laskien sähkölaitteen, valaisimen tai kodinkoneen aiheuttamia. Markkamääräisesti näiden laitteiden aiheuttamien vahinkojen osuus oli noin neljännes (Sähköala 1994). Ruotsissa oli sähkölaitteiden tai sähköasennusten osuus suurvahingoista (vahinko suurempi kuin 880 000 kr ennen vuotta 1991 ja 1 000 000 kr vuodesta 1991 alkaen) vuosina 1984 - 1994 28 % lukumääräisesti ja 22 % rahallisesti (Elbe 1994).

Taulukossa 5.1 esitetään esimerkkinä sähköpalojen jakautuminen eri sähkölaiteryhmien välillä sähköpalojen arvioidut osuudet asuntopaloista Yhdysvalloissa 1990 (U.S. Consumer Product Safety Commission, 1992). Ryhmässä "Muut sähkölaitteet" olivat 5 yleisintä laitetyyppiä suuruusjärjestyksessä: kuivausrummut, puhaltimet, lämmitysnauhat, pesukoneet ja televisiot.

Taulukko 5.1. Sähköpalojen arvioidut vahingot asuntopaloissa Yhdysvalloissa 1990 eri sähkölaiteryhmien mukaan (U.S. Consumer Product Safety Commission, 1992).

Tuoteryhmä	Tulipaloja (lkm)	Tulipaloja (%)	Vahinko (M\$)	Vahinko (%)
Lämmitys- laitteet	10100	7	76,1	6
Ruoanlaitto- laitteet	56900	38	224,3	19
Sähkönjakelu	42000	28	568,5	47
Ilmastointi	4500	3	36,2	3
Muut sähkölaitteet	20800	14	157,8	13
Muut	1500	1	10,4	1
Tuntemattomat laitteet	16700	11	164,8	14
Yhteensä	149900	100	1208,4	100

Sähköiset palonsyyt voidaan syttymismekanismin perusteella karkeasti jakaa neljään ryhmään:

- oiko- ja maasulut
- liitoskohdan huono kosketus
- ylikuormitus
- staattinen sähkö.

Liitoskohdan huono kosketus tai ylikuormitus voi sytyttää tulipalon ylikuumentumisen kautta, mutta myös johtaa valokaareen ja sillä tavalla sytyttää palon.

Sähköpalojen syttymissytilastoissa näkyy lisäksi usein myös ryhmä "väärin käytetyt sähkölaitteet". Nämä poikkeavat kuitenkin luonteeltaan edellä mainituista varsinaisista sähköisistä palonsyistä, koska perimmäinen syy tällöin on käyttäjän huolimattomuus, tietämättömyys tai tahallinen teko. Tällaisia ovat esimerkiksi väärin sijoitetut sähkölämmittimet ja päälle unohtuneet sähköliedet. Väärin käytetyt sähkölaitteet muodostavat tilastoissa suuren ryhmän. Esimerkiksi taulukossa 5.1 lähes puolet tapahtumista on merkitty lämmitys- ja

ruoanlaittolaitteiden syyksi, ja nämä palonsyyt ovat hyvin usein väärin käytettyjä sähkölaitteita (kohta 5.2).

Tulipalon jälkeen sähköjärjestelmissä esiintyy usein oikosulkujen ja valokaarien jälkiä. Jälki voi olla osoitus tulipalon syttymissyystä (ensisijainen jälki) mutta myös tulipalon seuraus eli tulipalossa lämpö on aiheuttanut valokaaren (toissijainen jälki). Lisäksi voi esiintyä normaalikäytön valokaaria ja kipinöitä, jotka eivät liity tulipaloon.

Sähköisten palonsyiden tutkimisen vaikeutena on, ettei ole olemassa rutiini-menetelmiä ensisijaisten ja toissijaisten vahinkojen erottamiseksi toisistaan (Jonson 1993). Usein on yhtä vaikeata osoittaa sähköisen syyn mahdollisuus syyttäjänä kuin syytymisyyden liittyminen varmasti sähköön.

Oppikirjan toisen osan luvussa 3 esitetään kirjallisuuskatsaus ongelman ratkaisemiseksi tehdyistä tutkimuksista ja niiden tuloksista. Kuparin metallurgisissa ominaisuuksissa tapahtuu muutoksia tulipalon eri vaiheissa ja niiden perusteella voidaan joskus tehdä arvioita palon kehityksestä, mutta tulosten tulkinta jättää usein vaihtoehtoja. Kirjallisuuskatsauksessa on myös kannanottoja, joissa tuodaan esille, kuinka sähköiset palonsyyt usein saavat toimia yleisenä syntyypukkina kun syytymisyy ei ole varmuudella selvinnyt. Valokaarijälkiä on näiden kannanottojen mukaan usein tulkittu väärin palon syyksi, vaikka ne ovat syntyneet tulipalossa sen syytymisen jälkeen.

Oikosulku- ja valokaarijälkien tarkka kartoittaminen on kuitenkin hyvä tehdä, koska ne saattavat kertoa, missä palo on ensiksi vaurioittanut kaapelia. Erikoistapaus on piiri, jossa on vain yksi oikosulku- tai valokaarijälki, ja sulake on lauennut. Valokaari tai oikosulku on silloin saattanut olla palon syytymiskodan lähellä, olipa syytymisyy ollut mikä tahansa. Jos valokaarijälkiä on paljon, ensimmäisen valokaaren tapahtumapaikka saattaa olla usein kauimpana voimalähteestä, joka voi olla sähköpäätaulu, paristo tai generaattori. Muut valokaaret ovat sitten tapahtuneet suojauksen laukeamatta, sitä mukaa kun palo on edennyt sähkölähdettä kohti.

Röntgenkuvauksella voidaan selvittää sähköjohtimien, kytkimien, liittimien, sulakkeiden ja muiden sähkölaitteiden kunto niitä avaamatta. Näin saadaan luotettava kuva niiden palonaikaisesta tilasta edellyttäen, että näytteenotto- ja kuljetusvaihe on tehty varovasti.

5.3.2 Oikosulut, maasulut ja valokaaret

5.3.2.1 OIKOSULUT JA MAASULUT, YLEISTÄ

Oikosulku tapahtuu kun virtapiirin jännitteiset virtajohtdot eristys- tai muun vian takia joutuvat sähköiseen (galvaaniseen) kosketukseen keskenään tai nollajohtodon kanssa.

Maasulku tapahtuu, kun virtajohto eristys- tai muun vian takia joutuu johtavaan kosketukseen maahan hyvin johtavan kappaleen tai maan kanssa.

Jos virtapiiri on turvallisuusmääräysten mukaisesti suojattu, täydellinen oikosulku ei yleensä aiheuta palovaaraa. Virtapiirin suojaukset (sulakkeet) toimivat nopeasti oikosulun jälkeen eikä oikosulun yhteydessä vapautuva energia nouse riittävän korkeaksi sytyttämään tulipaloa.

5.3.2.2 EPÄTÄYDELLINEN OIKOSULKU RESISTANSSIN KAUTTA

Jos oikosulkukohtassa virralla on resistanssia, ohmista vastusta, oikosulkukohta lämpenee Joulen lain mukaisesti, jolloin lämpöteho on virran neliö kertaa resistanssi. Vastuksen suuruuden mukaan sulakkeet toimivat vasta tietyn ajan kuluttua tai jos oikosulkuvirta on alhainen, eivät lainkaan.

Eristeiden mekaaninen vaurio, syöpyminen, vanheneminen tai kastuminen, vesivuodot tai sähköjärjestelmään tiivistynyt kosteus voivat aiheuttaa tällaisia oikosulkuja. Jos oikosulkuvastus on suuri ja vastaava virta pieni, sulake ei reagoi virhetilanteeseen, joka saattaa jäädä huomaamatta pitkäksi ajaksi.

Valokaarioikosulussa sähkö kulkee oikosulkukohtaan syntyvässä plasmakaassa. Siinä varauksenkuljettajat (elektronit ja ionit) liikkuvat suurella nopeudella ja törmätessään plasman atomeihin synnyttävät lämpöä, jolloin kohta kuumenee voimakkaasti.

5.3.2.3 TAVANOMAISISSA KÄYTTÖOLOSUHTEISSA ESIINTYVÄT VALOKAARET

Valokaari tai kipinäinti voi esiintyä virran katkaisun tai kytkemisen yhteydessä monessa laitteessa tavanomaisissa käyttöolosuhteissa, kuten kytkimissä ja joissakin moottoreissa. Tällaiset laitteet aiheuttavat hyvin harvoin tulipaloja normaaliolosuhteissa ja -ympäristöissä, koska asiaan on kiinnitetty huomiota jo laitteen suunnitteluvaiheessa eikä kipinäinnin kesto ja energia riitä sytyttämään paloa. Jos laite toimii tästä poikkeavassa ympäristössä, esimerkiksi ilman ja palavan kaasun, höyryn tai pölyn seoksessa, valokaari tai kipinäinti voi olla mahdollinen syttymissy. Näissä tapauksissa ongelmana on, että normaaliolosuhteissakaan esiintyvä valokaari ei yleensä jätä sellaista jälkeä, että se olisi osoitettavissa. Tällaiseen syttymissyhyyn voidaan silloin osoittaa vain epäsuoralla päättelyllä. Silloin tulee ainakin pystyä osoittamaan, että laite oli toiminnassa, arvioida valokaarissa purkautuva energia, mikä on ollut palava ympäristö ja sen minimisyttymisenergia. Lisäksi on pystyttävä sulkemaan pois kaikki muut mahdolliset syttymissyyt.

5.3.2.4 VAHINKOJEN YHTEYDESSÄ ESIINTYVÄT VALOKAARET

Valokaari voi myös esiintyä vahingossa, missä virralliset johtimet joutuvat sopivalle etäisyydelle toisistaan tai maahan. Valokaari voi myös syntyä johtimien eristeiden läpi, jos lämpötila nousee niin korkealle, että eristeet hiiltävät.

Valokaarioikosulussa sähkövirta kulkee johtimien välillä vaikka johtimet eivät kosketa fyysisesti toisiaan. Varauksen kulku johtimien välillä tapahtuu johtumalla

ionisoituneessa plasmassa. Ilmiö on sama, jota käytetään kaarihitsauksessa. Sähkövirtaa valokaassa rajoittaa kaaren vastus ja sulake saattaa reagoida oikosulkuun huomattavan hitaasti tai ei ollenkaan. Valokaassa voi vapautua hyvin suuri energia lyhyessä ajassa ja sen lämpötila voi olla 3000 ... 4000 °C. Valokaari saattaa kestää sekunteja jolloin syttymisen mahdollisuus on huomattava.

Valokaari voi siten sytyttää tulipalon. Jos sähköjohdoissa kulkee virta palon aikana, valokaarien esiintyminen on todennäköistä. Jos tulipalon jälkeen löytyy sulaneita kuparijohtimia, voidaan usein olettaa, että ne ovat syntyneet valokaarista, koska kuparin sulamislämpötila on 1083 °C ja tulipalolämpötilat ovat usein tätä alempia. Lämpötilat tulipalossa voivat kuitenkin paikallisesti ylittää puhtaan kuparin sulamislämpötilan. Sulaneet kuparijohtimet sijaitsevat silloin yleensä huoneen yläosassa ja niiden läheisyydessä olevat materiaalit ovat silloin vapauttaneet suuren energiamäärän lyhyessä ajassa. On hyvin epätodennäköistä, että lattialla olevat johtimet sulavat tulipalon lämmöstä ellei lattiakin ole palanut kunnolla. Kuumuudesta sulaneen kuparin jäljet poikkeavat usein jossain määrin valokaaren aiheuttamista jäljistä. Lisäksi saattaa esiintyä metalliseoksia, joiden sulamislämpötila on matalampi kuin puhtaiden komponenttien (kohta 4.1.6.2 ja 5.3.2.7).

Ongelmaksi jää silloin, liittyvätkö valokaarijäljet paloa aiheuttaneeseen tapahtumaan (ensisijaisia) vai ovatko jäljet palon aiheuttamia (toissijaisia). Ongelmalle ei ole varmaa vastausta, vaikka kirjallisuudessa on esitetty erilaisia vaihtoehtoja. Näistä Augerelektronispektroskopia, jossa mitataan hapen ja muiden palamisen yhteydessä syntyneiden alkuaineiden kuten hiilen, kloorin, rikin ja kalsiumin syvyysjakautumia kuparijohtimen valokaarijäljessä, vaikuttaa lupaavimmalta menetelmältä (oppikirjan toisen osan kohta 3.4.4).

Jotta valokaari syntyisi, tarvitaan jokin ulkoinen vaikutus kuten mekaaninen vaurio tai vettä, kosteutta tai johtavia esineitä koskettamaan virrallisia johtimia. Tavanomaisissa asunto-olosuhteissa valokaari ei synny itsestään, ja useimmissa tapauksissa, missä virralliset johtimet joutuvat fyysiseen kosketukseen keskenään, tapahtuu täydellinen oikosulku, jonka jälkeen piirin suojaus katkaisee virran. Jos valokaari syntyy, sen ylläpitämiseksi tarvitaan johtimien väliin sopivan kokoinen välimatka, koska muuten valokaari sammuu itsestään.

Kirjallisuudessa on esitetty, että valokaaren esiintyminen ja siitä johtuva tulipalon syttyminen olisi hyvin epätavallista tavanomaisissa asunto-olosuhteissa (Beland 1980, 1981, 1982a). Belandin tekemien kokeiden mukaan on mahdotonta aikaansaada valokaarta huoneenlämpötilassa ja alle 350 V:n jännitteillä elleivät johtimet ensin kosketa toisiaan ja sen jälkeen erkane toisistaan samalla tavalla kuin kaarihitsauksessa. Silloinkin virtalähde on valittava oikein, koska muuten valokaari joko sammuu itsestään tai muodostaa hyvän oikosulun, jolloin sulake laukeaa.

Tulipalotilanteissa sen sijaan kaapeleiden eristemateriaalien sähkönjohtavuudessa tapahtuu muutoksia, joka helpottaa johtimien välisen valokaaren syntymistä. Lämpötilan noustessa eristemateriaalin sähkönjohtavuus kasvaa jyrkästi, kunnes

materiaali sulaa tai hiiltyy muuttuen (puoli)johteeksi (Keski-Rahkonen ym. 1997) Usein nämä tilanteet eivät aiheuta sulakkeiden laukeamista, vaikka sulakkeet olisivat kunnossa. Valokaaren esiintyminen olisi siten todennäköisesti lämpenemisen seuraus. Lämpeneminen taas voisi johtua tulipalosta tai jostakin toisesta ilmiöstä, sähkövirrasta johtuva lämpeneminen mukaan luettuna.

Tulipalon syttyminen valokaaresta edellyttää lisäksi, että sen ympäristössä on sopivaa syttyvää materiaalia ja että sen vapauttama energia (teho ja kesto) riittää tämän sytyttämiseksi. Asunto-olosuhteissa esimerkiksi jähmeän puun syttyminen valokaaresta on epätodennäköistä. Hienojakoiset ainekset, palavat kaasut ja höyryt muodostavat taas huomattavan mahdollisen syttymisriskin.

Palon syytä järjestelmällisesti selvitettäessä on pidettävä mielessä, että epäiltäessä valokaarta mahdolliseksi palon syttymissyiksi, kaaren on esiinnyttävä alueella, johon palon syttyminen on voitu rajata. Sen alueen ulkopuolella voi esiintyä toissijaisia valokaaria.

5.3.2.5 VALOKAAREN JÄTTÄMÄT JÄLJET

Täydellisen oikosulun aiheuttama jälki on yleensä hyvin paikallinen ja rajoittunut kosketuskohtaan, jonka pinnalle on jäänyt pienehkö kuoppa. Joskus johtimet jäävät kiinni toisiinsa.

Valokaari sulattaa kuparia paikallisesti ja aiheuttaa äkillisiä muodonmuutoksia johtimessa. Vierekkäin saattaa olla useampien valokaarien jättämiä jälkiä. Sulanut kohta voi olla sileähkö kuoppa, jonka reunassa voi olla sulan kuparin ulkonema. Kuoppa voi myös olla rosoinen ja siinä voi olla monta pientä sulan kuparin ulkonemaa. Monisäikeisissä johtimissa voi paremminkin esiintyä pisanamuotoisia jälkiä ja johtimien yhteensulautumista kuin kuoppia. Valokaarijäljen vieressä on usein sulamaton kuparipinta, jonka päällä voi olla roiskeita valokaaren sulattamasta kuparista, jos johdin on ollut paljaana valokaaren aikana (NFPA 921, 1995).

Valokaari voi myös sulattaa johtimen poikki. Johtimen päähän muodostuu silloin usein pyöreä pisara. Monisäikeisessä johtimessa säikeet voivat sulaa yhteen.

Pisarointa saattaa irrota johtimista ja löytyä irrallisina palojäännöksistä erityisesti valokaaren palaessa suljetussa rasiassa.

Jos johtimen eriste on hiiltynyt, saattaa esiintyä valokaaria, jotka jättävät kymmenien senttimetrien pituisia jälkiä johtimeen sulattamalla tai katkaisemalla johtimia. Hiiltymisen tapahtuu luonnollisesti yleisesti tulipaloissa, jolloin myös usein esiintyy valokaaria. Kirjallisuudessa Beland (1981), sekä Delplace ja Vos (1983) esittävät, että löydettyä tavanomaisissa kotitalousolosuhteissa pitkiä (yli muutamien millimetrien pituisia) sulaneita johdinosia tai johtimia ympäröiviä sulaneita putkenosia, valokaari on ollut tulipalon aiheuttama eikä tulipalon syy. Tätä ei kuitenkaan voi pitää täysin ehdottomana sääntönä.

Valokaaren teräslevyihin aiheuttamat reiät ovat usein soikion muotoisia ja niiden reunat epäsäännöllisesti sulaneet.

Valokaaren purkauksessa vapautunut energia voidaan karkeasti arvioida purkausjäljistä mittaamalla sulaneen metallin määrä ja kertomalla tämä metallin sulamislämmöllä. Sulaneen metallimäärän arviointi voi tapahtua mikroskoopin mitta-asteikkoa käyttäen tai säännöllisistä metallinkappaleista (kiskot, levyt, langat) punnitsemalla vaurioitunut kappale ja vertaamalla tulosta samanlaisen vaurioitumattoman kappaleen massaansa. Purkausenergian perusteella voidaan arvioida kvantitatiivisesti purkauksen mahdollisuutta sytyttää paloa sen ympärillä olevissa kohteissa järjestämällä kokeita samankaltaisessa ympäristössä ja mittaamalla, millä purkausenergialla kohde syttyy. Menettely on käyttökelpoinen erityisesti teollisuuslaitteiden paloturvallisuutta arvioitaessa mutta myös palonsyyn tutkimuksessa selvitettyä, onko mahdollinen valokaaren purkaus voinut sytyttää kohteen.

5.3.2.6 VALOKAARIJÄLKIEIN JA MEKAANISTEN TAI TULIPALON AIHEUTTAMIEIN VAURIOIDEN VERTAILU

Valokaarijäljet ja mekaaniset jäljet voidaan yleensä erottaa toisistaan. Mekaanisten vaurioiden aiheuttamat kolot voivat päällisin puolin muistuttaa valokaarijälkiä, mutta tarkempi tutkimus yleensä paljastaa esim. viilan aiheuttamia uurteita tai veitsen aiheuttamia naarmuja ja jäljen mahdollisesti epäsymmetristä muotoa. Kaapeliin kohdistetut lyönnit voivat taivuttaa kaapelia tai kova esine voi jättää selvät pullistumat kaapelin reunoille. Mekaanisilla vaurioilla ei ole jähmettyneen kuparin ulkonemia.

Tulipalon aiheuttama kuparijohtimien sulaminen yli 1083 °C lämpötiloissa eroaa usein valokaarijäljistä siten, että palo aiheuttaa vaurioita selvästi laajemmalla alueella. Sulamisen jälkeen kupari usein valuu tai tippuu painovoiman vaikutuksesta, syntyy paikallisia ohentumia ja paksuuntumia sekä epäsäännöllisiä muotoja. Jos sulaminen on tulipalon aiheuttama, johtimen pinta on yleensä sulanut muttei keskiosa.

Mahdollinen tulipalon aiheuttaneen valokaaren jälki saattaa myös hävitä tai muuttaa muotoaan palon aiheuttaman valokaaren tai kuparin sulamisen takia. Valokaarijälkien puuttuminen ei siis välttämättä ole osoitus siitä, ettei valokaari olisi ollut palon sytyttäjä.

5.3.2.7 ALUMIININ TAI SINKIN SEOSTUMISESTA KUPARIIN AIHEUTUVAT JÄLJET

Kun kahta seostuvaa metallia sulatetaan, ne saattavat liueta toisiinsa seoksina, joiden sulamislämpötila on matalampi kuin toisen tai kummankin puhtaan komponentin sulamislämpötila (kohta 4.1.6.2). Puhtaan kuparin sulamislämpötila on 1083 °C ja alumiinin 660 °C. Seos 33 % kuparia - 67 % alumiinia sulaa kuitenkin jo lämpötilassa 548 °C, mikä on alhaisin kupari-alumiiniseoksen sulamislämpötila. Seos voi hitaasti muodostua myös metallien sulamislämpötiloja

alhaisemmissa lämpötiloissa. Jos sula alumiini on kosketuksissa esimerkiksi kuparijohtimen kanssa, sekoittuminen tapahtuu nopeasti, erityisesti johtimen ollessa kuuma, ja syntynyt seos sulaa nopeasti. Kuparijohtimen pinta voi tällä tavalla syöpyä tai sulaa kokonaan poikki kuparin sulamislämpötilaa alhaisemmissa lämpötiloissa myös virrattomassa johtimessa.

Samankaltaisia ilmiöitä aiheuttava toinen metalli on sinkki, jonka sulamislämpötila on 420 °C ja kiehumislämpötila 910 °C.

Alumiini- tai sinkkiseoksen aiheuttaman sulamiskohdan pinta voi olla alumiinin tai messingin värinen ja poiketa ympäröivän kuparin väristä.

Alumiinin tai sinkin mahdollinen vaikutus kuparijohtimen vaurioihin on otettava huomioon, ja vauriot ovat silloin tulipalon aiheuttamia eivätkä liity paloa aiheuttavaan ilmiöön.

5.3.3 Liitoskohdan huono kosketus (kuumat liitokset, löysät liitokset)

Virtapiirin liitoskohdan materiaalien on oltava puhtaita ja kosketettava toisiinsa riittävältä pinnalta, jotta sähkövirran kulkiessa vastus olisi riittävän pieni. Jos vastus on suuri liitoskohdassa, normaali sähkövirtakin voi kuumentaa liitoskohtaa niin, että se saattaa sytyttää ympäristössä olevia materiaaleja. Lämpeneminen riippuu vastuksesta, sähkövirrasta ja kuormituksen kestosta Joulen lain mukaisesti. Vain kuormitettu johto lämpenee.

Kuuma liitos voi olla liikuteltavassa johdossa tai kiinteässä asennuksessa.

Liikuteltavissa johdoissa, esimerkiksi pistorasiassa, kuuma liitos voi esiintyä esimerkiksi virheellisellä tavalla jatkettussa johdossa, jos liitosten kosketuspinnat ovat hapettuneet, kuluneet tai löystyneet (Kauppila 1975).

Kiinteissä asennuksissa liitoksen löystyminen saattaa johtua huolimattomasta asennuksesta, johtojen liikkumisesta korjaus- tai huoltotöiden aikana tai ympäristön tärinästä.

Kuuman liitoksen syntymekanismi on usein alkuperäinen huono kosketus, joka lämmittää liitosta pitkään synnyttäen oksidikerroksen liitoskohtaan. Tämän vastus kasvaa lisäten edelleen liitoskohdassa syntyvää lämpötehoa. Lopuksi liitoskohta saattaa hehkua, joka voi aiheuttaa tulipalon.

Kuumassa liitoksessa saattaa olla seuraavat tunnusmerkit:

- liitoksen osissa on paikallisen kuumentumisen jälkiä
- liitoskohtien pinnat ovat tummentuneet, kuoppautuneet tai syöpyneet
- liitos tai sen suojus on hiiltynyt syvältä palavan pinnan kosketuskohdasta

- kotelossa on vaurioitunut liitos, mutta toinen liitos on ehjä tai siinä on ainoastaan kuumuuden aiheuttama jälkiä. Tämä edellyttää, etteivät matalalla sulavat metallit, kuten alumiini ja sinkki, ole seostuneet kupariin.

Tulipalon syttyminen kuumasta liitoksesta edellyttää, että

- sähköjohdin on ollut kuormitettuna
- johtimen ympäristössä on ollut palavaa materiaalia, joka voi syttyä liitoksen lämmöstä.

5.3.4 Ylikuumentuneet sähköjohdot (ylikuormitus)

Kun sähkö virtaa johtimessa, se lämpenee. Asianmukaisissa asennuksissa johtimen poikkipinta on mitoitettu vastaamaan suunniteltua kuormitusta, ja johdon alkupää on varustettu ylivirtasuojalla, jotta johdin ei kuumenisi liiallisesti.

Jos ylivirtasuoja on väärin mitoitettu, virheellinen tai puuttuu kokonaan, johdin saattaa ylikuormittua ja sen seurauksena lämmetä, mikä voi sytyttää tulipalon johtimen ympäristön palaviin materiaaleihin. Ylikuormittunut johdin voi sulattaa eristeen aiheuttaen oikosulun tai valokaaren. Ylikuormittuminen vaurioittaa yleensä huomattavan osan johdosta. Syttyminen saattaa tapahtua pitkänkin kuumentumisjakson jälkeen. Ylikuormitus vaurioittaa johdon kauttaaltaan, läpivientikohdatkin, mutta tulipalon aiheuttama ulkoinen lämpö vain lämmölle altistuneet kohdat.

Johtimen on tietysti myös oltava jännitteinen, jotta se ylikuumentuisi.

Merkkejä johtimen ylikuumentumisesta ovat mm. seuraavat (NFPA 907M 1988):

- Johtimen eriste on sisäpuolisesta lämpenemisestä vaurioitunut koko matkaltaan ylikuormituskohdasta vIRRANSYÖTTÖÖN. Vauriot voivat olla täydellinen tai osittainen sulaminen, irtoaminen johtimesta ja eristeen hiiltymisen sisältä mutta ei pinnalta. Jos johdin on ollut ylikuormitettu, vastaavat jäljet johtimen eristeissä löytyvät myös palaneen alueen ulkopuolelta.
- Johtimen ylikuormitussuojassa on puutteita.
- Palo on saattanut syttyä monesta kohdasta, jotka kaikki ovat johtimen välittömässä läheisyydessä.
- Hiiltymiä esiintyy johtimen puurakenteiden läpivientikohdissa.
- Jos johdin on sulanut voimakkaasta ylikuormituksesta, se saattaa sulaa kauttaaltaan ja lopullisesti katketa, minkä jälkeen virta katkeaa ja johdin jäähtyy. Jähmettyneessä johtimessa voi silloin esiintyä olkamaisia kohtia joissa johdin on melkein katkennut (NFPA 921 1995).

Ylikuormituksen tulee yleensä olla huomattava ennen kuin eriste sulaa, syttyy tai valokaari syntyy. Esimerkkinä voidaan mainita Grayn et al. kokeet (1983), joissa ylikuormitettiin PVC-muovilla eristettyä kaapelia, kaapelin nimelliskäyttövirta oli 5 A. Havaittiin tarvittavan yli 35 A:n virtoja eristeen sulattamiseen ja oikosulun synnyttämiseksi. Aika vaurion syntyyn pieneni selvästi virran kasvaessa. Liekkien esiintyminen ei ollut läheskään varmaa alle 50 A:n virroilla, koska palavien pyrolyysituotteiden virta eristeistä ei ollut riittävä johtimien kosketushetkellä. Hitaasti lämmittäen (alle 40 A:n virroilla) valtaosa pyrolyysituotteista hävisi eristeistä ennen oikosulkua. Jos kaapeli peitettiin matonpalalla, lämmöneristys edisti tapahtumia ja kasvaneen palavan aineen määrä kaapelin ympärillä teki myös syttymisen todennäköisemmäksi. Oikosulku tapahtui nyt pienemmillä virroilla, mutta merkittävää ylikuormittumista (yli 30 A) tarvittiin nytkin palon sytyttämiseksi.

Sähkömoottoreiden ylikuormittumista saattaa myös esiintyä. Tämä voi johtua esimerkiksi mekaanisesta ylikuormituksesta, alijännitteestä tai yhden vaiheen katkeamisesta kolmivaihemoottoreissa (Kauppila 1975). Tavanomainen sulakesuojaus ei välttämättä suojaa näiltä ilmiöiltä, mikä johtaa moottorin kuumenemiseen. Moottoreiden rakenteissa on tähän tarkoitukseen yleensä moottorinsuojakytkimenä lämpötila-anturi, joka toimii osana ylikuormitus-suojausta. Moottoreiden ylikuormittuminen voi myös johtua riittämättömästä jäähdytyksestä. Esimerkkinä tästä on palavan pölykerroksen kertyminen moottorin päälle.

Vaurioituneet johtimet ja ylikuumeneminen

Jos johtimessa on kuoppa tai muu ohentuma, johtimen poikkipinta-ala on pienempi siinä kohdassa ja vastus suurempi kuin johtimen muissa osissa. Kohta ei kuitenkaan lämpene niin paljon, että se saattaisi aiheuttaa palovaaraa johtimen normaaleilla sähkövirroilla. Tämä johtuu kuparin hyvästä lämmönjohtuvuudesta, jonka siirtää ylimääräistä lämpöenergiaa vaurioitumattomiin johtimen osiin (Beland 1982b).

5.3.5 Staattinen sähkö, salama

5.3.5.1 STAATTINEN SÄHKÖ

Staattisesta sähköstä teollisuuden vaaratekijänä on suuri määrä kirjallisuutta ja suojeluohjeita. Staattisen sähkön fysikaalisista ilmiöistä ja sen aiheuttamista vaaratilanteista prosessiteollisuudessa on selkeä yleisesitys Leesin (1980, luku 16.5) laajassa käsikirjassa. Suomessa sovellettavia staattisen sähkön varoitoimenpiteitä on esitetty SFS-käsikirja 118:ssa, ja siinä on myös käsitelty jonkin verran staattisen sähkön ilmiöitä, joista on hyötyä palonsyöntutkinnassa.

Kun eriste tai eristetty johdekappale saavuttaa tietyn staattisen sähkövarauksen, on mahdollista, että varaus purkautuu, useimmiten kipinäpurkauksena. Tämä ei pysty sytyttämään jähmeitä aineita, mutta sen sijaan syttyvien kaasujen, höyryjen

tai pölyjen seoksia. Syttyminen edellyttää seuraavien ehtojen samanaikaista täyttymistä (Sulonen 1994):

- 1) sähkövarauksen potentiaaliero purkauskohtaan nähden riittää synnyttämään purkauksen
 - 2) purkaus tapahtuu räjähtävässä seoksessa
- ja
- 3) purkauksen energia on suurempi kuin seoksen minimisyttymisenergia.

Varautuminen saattaa tapahtua monenlaisella tavalla. Monet nesteet, esimerkiksi bensiini, varautuvat virratessaan putkistossa. Pölyjen käsittelyssä pölyhiukkaset varautuvat ja laitteet sekä koneet jotka ovat kosketuksessa varautuneen pölyn kanssa. Koneiden ja laitteiden liikkuvat osat, esimerkiksi vetohihnat, kuljetinhihnat, pyörivät telat ja sylinterit varautuvat kosketusvarautumisen johdosta. Ihminen voi varautua kosketuksen takia esim. kävellessään kokolattiamatolla, jos hän on eristetty niin, että varaus ei pääse purkautumaan riittävän nopeasti. Eristeenä voivat olla henkilön eristävät, kumiset tai muoviset kengänpohjat, tai hän on eristävällä alustalla tai lattialla.

Staattisen sähköön vaaran estäminen tapahtuu etupäässä valitsemalla koneille, laitteille, työkaluille ja työvaatteille sopivat materiaalit, jotka purkavat varausta, eivät kipinöi eivätkä varastoi minimisyttymisenergiaa suurempia sähköenergioita. Toinen keino on luotettava koneiden, työkalujen ja mahdollisesti myös ihmisten maadoittaminen sekä mahdollisesti sitä täydentävänä ilman kostuttaminen. Siirrettävässä isoja määriä palavia nesteitä on noudatettava erityistä varovaisuutta, koska nesteiden virratessa periaatteessa voisi syntyä monenlaisia tilanteita, joissa neste varautuu. Erityisen vaarallisia ovat sähköä hyvin eristävät dielektriset nesteet suurina määrinä, sillä niistä varausten purkaminen maadoituksellakin on hyvin vaikeata.

Vesipisaroiden joutuminen syttyvien öljytuotteiden sekaan niitä käsiteltäessä voi aiheuttaa voimakkaita staattisia sähkövarauksia, koska vesipisarot ovat usein näitä nesteitä raskaampia ja laskeutuvat lopulta nestesäiliöiden pohjalle. Laskeutuessaan ne kuitenkin varaavat eristävän palavan nesteen ja aiheuttavat staattisen vaaratilanteen, joka tuntuu ensi alkuun terveen järjen vastaiselta. Meillä hyvin tunnettu esimerkki oli Neste Oy säiliöpalo vuonna 1989 (Suuronnettomuuden tutkintaselostus N:o 2/1989), joka syttyi jopa kahteen kertaan palokunnan vaahdottaessa avoimen isoheksaanilammikon pintaa säiliössä, jonka kelluva katto oli osittain painunut isoheksaanipinnan alapuolelle katolle kertyneen veden painosta kun katon keskellä olevan miesluukun ruuvit oli unohdettu kiinnittää. Tutkintaselostuksessa syytymissyytä ei ole mainittu eikä mitään selvää syytä ole voitu esittää, mutta syy selvisi myöhemmin kansainvälisten öljy-yhtiöiden pitämistä onnettomuustilastoista, kun samanlaisia tapauksia sattui muutamia muuallakin. Nesteen palossa vaahdon hajotessa syntyneet vesipisarot painuivat isoheksaanisäiliön pohjalle ja varasivat tämän erittäin hyvin sähköä eristävän

nesteen. Nestehöyry syttyi palomiehen ruiskuttaessa säiliön katolla olevalta sillalta vaahtoa, jolloin kipinä iski varautuneen isoheksaanipinnan ja vaahtosuihkun/suuttimen välillä, minkä myös asianomaisten henkilöiden kertomukset vahvistivat. Ilmiöstä oli saatavilla paljon tutkittua tietoa, sillä jo 1878 Dorn havaitsi tämän varausilmion (Klinkenberg & van der Minne 1958), mutta vaahtojen tehokkaan sammutusvaikutuksen vuoksi toisenkaltaisissa tilanteissa asiaan ei ollut kiinnitetty riittävää huomiota.

Veden aiheuttamat varautumat havaittiin myös syyllisiksi joulukuussa 1969 kolmen supertankkerin räjähdykseen. Öljytankkeja, jotka olivat huomattavasti aiempien laivojen tankkeja suurempia, pestiin voimakkailla vesisuihkuilla juuri ennen räjähdystä. Mittavan tutkimustyön jälkeen voitiin havaita, että pesusta aiheutuva vesisumu sai aikaan varautumisen, joka ei suuressa tilassa ehtinyt purkautua, ja johti räjähdykseen (Makin 1975).

Palonsyyn selvittämisen kannalta staattinen sähkö on hankalasti osoitettavissa, koska varausolosuhteet häviävät usein syttymisen jälkeen. Paloa edeltäviä olosuhteita joudutaan silloin arvioimaan käytettävissä olevan tiedon perusteella ja päättämään, ovatko yllä mainitut edellytykset syttymiselle olleet olemassa ja onko todennäköistä, että staattisen sähköön purkaus olisi sytyttänyt tulipalon.

5.3.5.2 SALAMA

Salama on erikoistapaus staattisesta sähköstä, joka syntyy kun pilveen ja pilven alapuolelle maahan kertyneet vastakkaismerkkiset sähkövaraukset purkautuvat. Salama koostuu useammasta osapurkauksesta, jotka seuraavat toisiaan noin 50 ms välein ja yksittäinen salama voi koostua 40:stä osapurkauksesta. Jokaisen osapurkauksen rata on yleensä suora, mutta sen suunta poikkeaa jossain määrin edellisen osapurkauksen suunnasta. Näin muodostuu salaman tunnusomainen siksak-kuvio.

Purkauksessa kulkeva virran voimakkuus voi olla erittäin suuri, ääritapauksissa 270 kA mutta kestoaltaan vain muutama mikrosekunti. Pienempiä virtoja voi myös esiintyä ja kestää kauemmin. Potentiaaliero pilven ja maan välillä voi olla 15 MV (Davis 1986). Salamista ja niitä vastaan suojautumisesta on lyhyesti ohjeita myös SFS-käsikirja 118:ssa.

Salama aiheuttaa tulipalon vain silloin, kun iskussa vapautuu riittävästi energiaa sytyttämään palavan materiaalin. Salaman lyhyen keston takia vapautunut energia ei aina ole tähän riittävä.

Salaman sytyttämän tulipalon edellytyksenä on tietysti, että sääolosuhteet ovat suosineet salamointia. Tietoa sääolosuhteista saa Ilmatieteen laitokselta.

Salamaa seuraa aina voimakas jyrinä, ja yleensä löytyy henkilöitä jotka voivat vahvistaa tai kumota oletukset mahdollisesta salamaniskusta.

Salama iskee useimmiten rakennuksen korkeimpaan kohtaan ja jatkaa sen jälkeen rakennuksen läpi seuraten pienimmän vastuksen reittiä. Puurakenteessa salama

höyrystää äkillisesti puussa olevaa kosteutta, joka laajenee ja rikkoo puuta; jälki näyttää räjähtäneeltä. Samanlainen räjähtäminen voi esiintyä salaman iskiessä betoniin, jolloin siinä oleva kidevesi höyrystyessään rikkoo betonin. Salama voi kulkea rakennuksen sähköjärjestelmässä ja kuumentaa tai sulattaa sähköjohtimia. Vesijohtoputkisto on myös salaman mahdollinen kulkureitti. Salamaniskun yhteydessä syntynyt paineaalto voi rikkoa rakenteita kuten ikkunoita.

Vaurioiden esiintyminen rakennuksessa ei kuitenkaan edellytä, että salama olisi iskenyt rakennukseen, koska esimerkiksi sähköjohtoja pitkin salama tai sen aiheuttama ylijännite voi kulkea pitkiäkin matkoja. Salaman aiheuttamat ylijännitteet voivat vaurioittaa sähkölaitteita, ja nämä viat saattavat aiheuttaa vaaratilanteita vasta myöhemmin joko normaalin käyttöjännitteen tai jännitehäiriöiden vaikutuksesta.

Kuivalla säällä salama voi sytyttää metsä- tai ruohopaloja. Elävien puiden syttyminen on kuitenkin epätodennäköistä niissä olevan kosteuden vuoksi.

5.3.6 Sähköisten palonsyiden tutkiminen

5.3.6.1 JOHDANTO

Sähköisten palonsyiden selvityksessä kuten muissakin palonsyynselvityksissä pyritään ensiksi määrittämään syttymiskohta tai -alue mahdollisimman tarkasti. Tämän jälkeen tutkimus kohdistuu syttymisalueella oleviin sähkölaitteisiin.

Tutkimuksen vähimmäistavoitteena on vastata kysymykseen: oliko syttymislähde sähköinen vai voidaan se sulkea pois syttymissyynä.

Sen jälkeen selvitetään mahdollisuuksien mukaan, mistä laitteesta tai komponentista tapahtumaketju sai alkunsa ja mitkä olosuhteet aiheuttivat paloon johtaneen toiminnan.

Sähköjohdot, -kytkimet jne. vaurioituvat tulipalossa yleensä melkoisesti ja hajoavat herkästi kosketuksesta. Siksi ne on valokuvattava koskematta niihin: yleiskuva ja riittävästi yksityiskohtaisia kuvia. Erityisesti kytkimien asennot on muistettava valokuvata ennen kytkimien kääntämistä.

Seuraavassa esitetään luettelo keskeisiä asioita sähköisen palonsyyn selvityksestä. Osa on esitetty jo aikaisemmissa luvuissa, mutta toistetaan tässä luettelon täydellisyyden vuoksi. Tässä oletetaan, että palon syttymiskohta tai -alue on pystytty rajaamaan.

5.3.6.2 YLEISIÄ ASIOITA

1. Selvitetään palokunnan tekemiset palopaikalla: milloin, mitä sammutti ja miten, mitä rikkoi, mitä siirsi jne.
2. Oliko rakennukseen kytketty sähkövirta ja miten, esimerkiksi sähkölaitoksen liittymän kautta, tilapäisjohtojen kautta, generaattoreista tai akuista?

3. Paikallisesta sähköyhtiöstä ja/tai sähköasennuksia tehneestä yrityksestä pyydetään tietoa ja piirustuksia sähkön kytkemisestä, jakelusta ja asennuksista ja korjauksista, mitä on tehty ja milloin. Piirustuksiin merkitään oleellisten havaintojen paikat selityksineen. Jos piirustus ei ole kovin selkeä tai jos sitä ei ole saatavissa, tehdään yksinkertaistettu piirros, johon merkitään palaneen kohteen liittymisjohto jakeluverkosta, pääkeskus, nousujohdot varokkeineen, mittauskeskus, ryhmäkeskus varokkeineen sekä oleelliset sähkölaitteisiin ja -joh-toihin liittyvät havainnot.

4. Ajoituksen selvitys.

Selvitetään, milloin ja miten sähkönjakelu palavaan rakennukseen katkaistiin. Milloin palo havaittiin ja milloin valot sammuiivat ja miten, rakennuksen kaikki valot samanaikaisesti, yksitellen vai ryhmittäin.

Tarkistetaan rakennuksen verkkoon kytketyt sähkökellot ja niiden osoittamat ajat. Jos kello näyttää sähkönjakelun katkaisun aikaa, oikosulku on epätodennäköinen sähköpiirissä, johon kello on kytketty.

Selvitetään paloon liittyvät havainnot sekä niistä saatavat ajoitustiedot sähkölaitteiden säätö- ja valvontajärjestelmien käyttöpäiväkirjoista, hälytys- ja vastaavista listoista.

Vaikka puhelinjohdot ovat ani harvoin palon aiheuttajia, tässä samassa yhteydessä kannattaa tarkistaa myös puhelinlaitokselta rakennukseen tullut puhelinliikenne ja yhteyksien katkeaminen, jonka laitokset tallentavat yleensä vain lyhyeksi aikaa. Nämä tiedot voivat olla arvokkaita ajoitettaessa palotapahtumia.

5. Henkilöhaastattelut.

Silminnäkijöiltä kysytään, mitä he näkivät, kuulivat, tunsivat tai haistoivat. Näkyikö kipinöintiä, valokaaria tai muita sähköhäiriöitä. Mistä ja milloin on kuultu sähkölaitteiden ääniä (ilmastointipuhaltimet, jääkaapit, pakastimet, liesituulettimet jne.).

Kiinnitetään huomiota paitsi suoraan palotapahtumiin liittyviin havaintoihin myös paloa edeltäviin, erityisesti sähköhäiriöihin liittyviin poikkeavuuksiin. Tällaisia ovat mm. säähavainnot, kuten salamointi, ukkonen, kova pakkanen tai kuumuus, sulakkeiden palamiset, vialliset tai huonosti toimivat kytkimet ja laitteet, äskettäin tehdyt johdotus- ja muut sähkötyöt, mitkä sähkölaitteet olivat käytössä, uusien sähkölaitteiden käyttöönotto, kuivatus sähkölaitteilla, sähkölämmitys ja silittäminen.

Paikallisen sähköyhtiön tarkastajan antamat tiedot ja piirrookset kohteen sähköasennuksista ovat usein välttämättömät.

5.3.6.3 SÄHKÖLAITTEISIIN LIITTYVÄÄ

6. Palon syttymiskohdan määrittämisen jälkeen selvitetään tämän alueen sähkölaitteet, mm.:

- kiinteät sähköjohdot rakenteissa
- pistorasiat
- sähkölaitteet ja -liittimet
- jatkojohdot
- valaisimet

7. Selvitetään mihin pääkeskukseen (ryhmäkeskukseen) kohdan 6 sähkölaitteet oli kytketty. Selvitetään sulakkeiden koko ja tila sekä onko sulakkeita mahdollisesti ohitettu jollakin asiattomalla järjestelyllä. Selvitetään pääkytkimen asento.

8. Selvitetään pääkeskuksen (ryhmäkeskuksen) ja syttymiskohdan/alueen väliset sähköjohdot ja niiden tila mahdollisuuksien mukaan. Etsitään mahdollisia oikosulun, valokaaren, ylikuormituksen tai ulkoisen lämmityksen jälkiä. Merkitään kohtien sijainti piirroksen ja valokuvataan. Otetaan tarvittavat näytteet.

Tarkistetaan että johtimet ovat oikein mitoitettut sulakkeisiin nähden. Käytetään saatavia sähköasennuspiirustuksia hyväksi.

9. Oliko kohdan 6 sähkölaite kumossa, pudonnut lattialle tai vaurioitunut ennen palokunnan toimenpiteitä?

10. Oliko sähkölaite sopimattomassa tai epätavallisessa paikassa?

11. Oliko laite kytkettynä verkkoon? Tarkistetaan pistokytkimien tila ja niissä olevat palojäljet, jotka voivat kertoa, onko pistotulppa ollut rasiassa palon aikana.

12. Oliko sähkö kytkettynä laitteeseen (laite päällä)? Selvitetään kytkimen/kytkimien asennot ja niissä olevat savu- ynnä muut palojäljet. Jos kytkimien muoviosat ovat hävinneet, jäljelle jääneistä metalliosista voidaan mahdollisesti selvittää kytkimen asento. Valaisimien kytkimien asennoista ei voida sanoa, oliko piiri suljettu vai ei, vaan piiri on tarkistettava. Käytävissä on usein monta kytkintä, jotka ohjaavat samaa valaistusta. Kytkimet valokuvataan ennen kääntämistä tai avaamista.

13. Oliko laitteessa vika, joka johti osaan laitteesta jännitteen, vaikka laitteen virtakatkaisin oli aukiasennossa?

14. Oliko laite käytössä palon alkaessa tai milloin laite oli viimeksi käytössä? Käytettiinkö laitetta oikein ja oikeaan tarkoitukseen?

15. Rajoittuiko palo sähkölaitteeseen? Onko merkkejä siitä, että laitteen sisäosat olisivat kuumentuneet enemmän kuin ulkoinen palo olisi voinut aiheuttaa? Hiiltymisen, hiiltymissyvyys, sulaneet aineet tai palanut maali voivat osoittaa, onko sisä- vai ulkopuoli ollut kuumempi.

5.3.6.4 SYTTYMISKOHDASSA OLEVA PALAVA MATERIAALI JA SEN LIITTYMINEN SÄHKÖLAITTEeseen

16. Viittaavatko palojäljet palon leviämiseen sähkölaitteesta?

17. Oliko palon syttymiskohdassa muita lämmönlähteitä kuten sähköttömiä lämmitys- tai keittovälineitä, tupakoitsijan välineitä, kynttilöitä tms.?

18. Mikä oli ensiksi syttynyt materiaali:

- jähmeä palava materiaali kuten puu, paperi, sähköjohtimien eristeet, muovi
- neste, sen höyry, kaasu tai pöly, joka on voinut syttyä valokaaresta tai kipinästä.

19. Oliko palava materiaali asiattomasti sijoitettu tai varastoitu?

20. Onko sähkölaitte voinut kuumentua niin paljon, että se olisi voinut sytyttää ympärillä olevia aineita joko normaalikäytössä tai vikatilanteessa?

21. Oliko sähkölaitte voinut palaa liekillä ja sytyttää ympärillä olevia aineita normaalikäytössä tai vikatilanteessa?

22. Oliko nesteen, kaasun tai pölyn tapauksessa lähistöllä sellainen sähkölaitte, joka olisi voinut tuottaa valokaaren tai kipinän?

5.3.6.5 EPÄTAVALLISET OLOSUHTEET

23. Oliko ennen paloa ukkosta tai muita epätavallisia luonnonilmiöitä?

Jos oli, oliko rakennuksen sisä- tai ulkopuolella epätavanomaisia vauriota kuten

- sulaneita tai epämuodostuneita metalliosia
- yksittäisiä hiiltymiä
- "räjähtänyttä" puutavaraa

24. Esiintyikö merkkejä sellaisten metalliesineiden kuumenemisesta, jotka eivät tavallisesti ole sähköistettyjä, tai niistä lähteviä valokaaria?

5.3.6.6 VIAN TUNNISTAMINEN

25. Vian tunnistaminen

Jos palon syy on ollut sähköinen, sen aiheuttanut komponentti tai laite kirjataan muistiin mahdollisimman tarkasti. Selvitetään valmistajan nimi, laitteen malli ja numero, sarjanumero, käyttöjännite ja virta sekä mahdolliset turvallisuustasoa osoittavat sertifiointimerkinnot.

Sähköjärjestelmissä esiintyy erilaisia tilanteita, jotka saattavat johtaa tulipaloon. Näistä tavallisimmia ovat oiko- ja maasulut, kuumat liitokset, ylikuormitus ja staattinen sähkö sekä salamet (kohdat 5.3.2 - 5.3.5). Kaikissa näissä tapauksissa vapautuu energiaa, joka voi sytyttää tulipalon. Tutkimuksessa selvitetään, mitä energiaa vapautui, mikä materiaali syttyi ensiksi ja mikä oli vikaantumismekanismi.

Vikaantumismekanismia voi olla erilaisia, joista tavallisimmat ovat

- iän tai muun syyn aiheuttama huononeminen tai rappeutuminen
- laitteen tai sen osan väärinkäyttö tai käyttäminen väärässä ympäristössä, myös tahallisesti
- virheellinen sähköasennus
- vahinko
- suunnitteluvirhe
- valmistusvirhe.

26. Näytteenotto

Laite, sen osa tai johdotuksen osa, joka mahdollisesti liittyy palon syttymiseen, otetaan talteen kohdan 3.6.2 mukaisesti.

5.3.7 Paloa aiheuttavia sähkölaitteita

Jokainen sähkölaitte voi suotuisissa olosuhteissa aiheuttaa tulipalon edellyttäen, että se on jännitteinen. Seuraavassa luetellaan lyhyesti tavallisimpia paloa aiheuttavia sähkölaitteita. Joitakin käsitellään tarkemmin kirjan muissa kohdissa.

Lämpövastuksia sisältävät laitteet

Sähkövastuksen tuottamaan lämpöön perustuvat laitteet ovat väärin käytettyinä aiheuttaneet useita asuntopaloja. Tällaisia ovat esimerkiksi sähköliedet, lämpöpatterit ja muut lämmittimet, kahvinkeitin, leivänpaahdet, silitysraudat, astianpesukoneet, vaatteiden pesukoneet ja kuivaajat sekä kiukaat.

Esimerkkejä väärästä käytöstä ovat ruoan unohtaminen kuumalle levyille, silitysraudan kuuman pinnan jättäminen kankaan päälle ja lämmityslaitteen peittäminen tai sijoittaminen liian lähellä herkästi syttyvää materiaalia.

Televisiot

Television peittäminen tai sijoittaminen siten, että jäähdyttävä ilmanvaihto estyy, voi aiheuttaa tulipaloon johtavaa ylikuumenemista. Liiallinen lämpeneminen edistää myös komponenttivikojen syntymistä, jotka puolestaan voivat aiheuttaa paikallista ylikuumenemista ja johtaa komponenttien tuhoutumiseen termisesti. Myös kynttilän steariinin, huonekasvien lehtien tai muiden esineiden joutuminen TV:n sisään voivat olla TV-palon alkusyynä.

Hehkulamput

Peitetyt tai herkästi syttyvään materiaaliin kaatuneet hehkulamput voivat sytyttää tulipalon.

Jääkaapit

Jääkaapin tai pakastimen termostaatin vioittuminen ja/tai koneiston likaantuminen, erityisesti kaapin taakse kertyvä pöly, voi johtaa tulipaloon.

5.4 LAITEVIAT

5.4.1 Yleistä

Laitteita on niin monenlaisia, ja vikaantumismahdollisuudet niin lukuisia, että palon syyn selvittäminen ei yleensä ratkea jonkun viallisen osan löytymisellä, vaan koko syttymiseen johtava tapahtumasarja on selvitettävä. Tässä osassa esitetään vain muutamia mahdollisia ongelmatilanteita.

Epäillyn kohteen komponenttien toimivuus tarkistetaan yksitellen. Jos ne toimivat palon jälkeen, on todennäköistä, että ne toimivat myös ennen paloa. Silloin voidaan kyseinen komponentti sulkea pois epäiltyjen joukosta. Jos komponentti ei toimi palon jälkeen, jää ongelmaksi, onko toimimattomuus palon syy, seuraus vai liittyykö se ollenkaan palotapahtumiin.

5.4.2 Vialliset sähkölaitteet

Sähkölaitteista katso kohta 5.3.7.

Sähköisten säätölaitteiden komponentit kuten kytkimet, releet, solenoidit, vastukset, ajastimet, muuntajat, termistorit voivat vikaantuessaan olla mahdollisia palon sytyttäjiä.

5.4.3 Kitkan aiheuttamat syyt

Kitkan aiheuttama lämmön nousu liittyy aina laitteiden liikkuviin ja toisiinsa hankaaviin osiin. Tällaisia ovat esimerkiksi

- riittämättömästi voidellut tai loppuunkuluneet laakerit
- ylikuumentuneet jarrut tai niiden irronneet osat
- löysät kiilahihnat, missä pyörivä hihnapyörä lämmittää luistavaa hihnaa
- hihna- ja kourukuljettimien kuljetin- ja tukirullien sekä veto- ja taittorumpujen hankaus kuljetinta vasten
- pumppujen ja kompressorien liikkuvat osat.

On mahdollista, että kuminen hihna voi kyteä jonkin aikaa ennen kuin se leimahtaa liekehtiväksi paloksi. Kuljettimissa palo voi levitä nopeasti, yllättävästi ja laajalle alueelle. Esimerkkinä voidaan mainita kuljetinjärjestelmän palo Kuusankoskella 1993 (Katajamäki 1993a, 1993b), jossa katkennut, palava hakekuljettimen hihna levitti paloa erittäin nopeasti kuljettimessa.

Kitka voi myös aiheuttaa lämmön nousua kauempana varsinaisesta kitkakohdasta. Jumiutunutta liikkuvaa osaa pyörittävä moottori voi kuumentua sisältä päin, jolloin sen käämitys syttyy ja mahdollisesti sytyttää sen lähellä olevaa palavaa ainetta. Toinen mahdollisuus on, että moottorin ylikuormittuessa tai joutuessa oikosulkuun sen verkosta ottama virta ylikuumentaa sähköjohdot, jotka syttyvät ja sytyttävät ympäristöönsä (Carroll 1979, s. 284). Verkon ylivirtasuojan ja sähkömoottorin moottorinsuojakytkimen pitäisi kuitenkin normaalisti estää moottorin tai sähköjohtojen ylikuumentuminen, mutta suojauksen vika tai sopiva kuormittava impedanssi, joka ei vielä laukaise suojaa, voi aiheuttaa ylikuumentumisen seurauksena syttymisen.

5.4.4 Palavien kaasujen ja nesteiden jakeluverkot ja laitteet

Palavien kaasujen ja nesteiden jakeluverkot ja laitteet ovat aina mahdollisia palon aiheuttajia. Tällaisia ovat esimerkiksi nestekaasulla, maakaasulla tai erilaisilla maaöljytuotteilla toimivat laitteet.

Näistä asioista löytyy lisää tietoa kohdissa 5.2.1 lämmittäminen, 5.2.3 ruoanlaitto, 8 kaasupalot sekä 9 räjähdykset.

Näissä tapauksissa vuoto- ja/tai vikamahdollisuuksia on ainakin seuraavissa osissa: putket, suuttimet, venttiilit, paineensäätimet, termostaatit ja rajoittimet.

Erityisesti kiinnitetään huomiota laitteisiin ja koneisiin, joissa on paineistettu voitelu- jäähdytys- tai voimansiirtoöljyjärjestelmä. Paineisen öljyn vuotaessa tällaisesta järjestelmästä syntynyt sumusuihku syttyy erittäin helposti, palaa

suurella teholla ja leviää erittäin hyvin lähiympäristöön (Simonson 1996, Schacht 1986).

5.5 AVOIMET LIEKIT JA KIPINÄT

5.5.1 Tulityöt

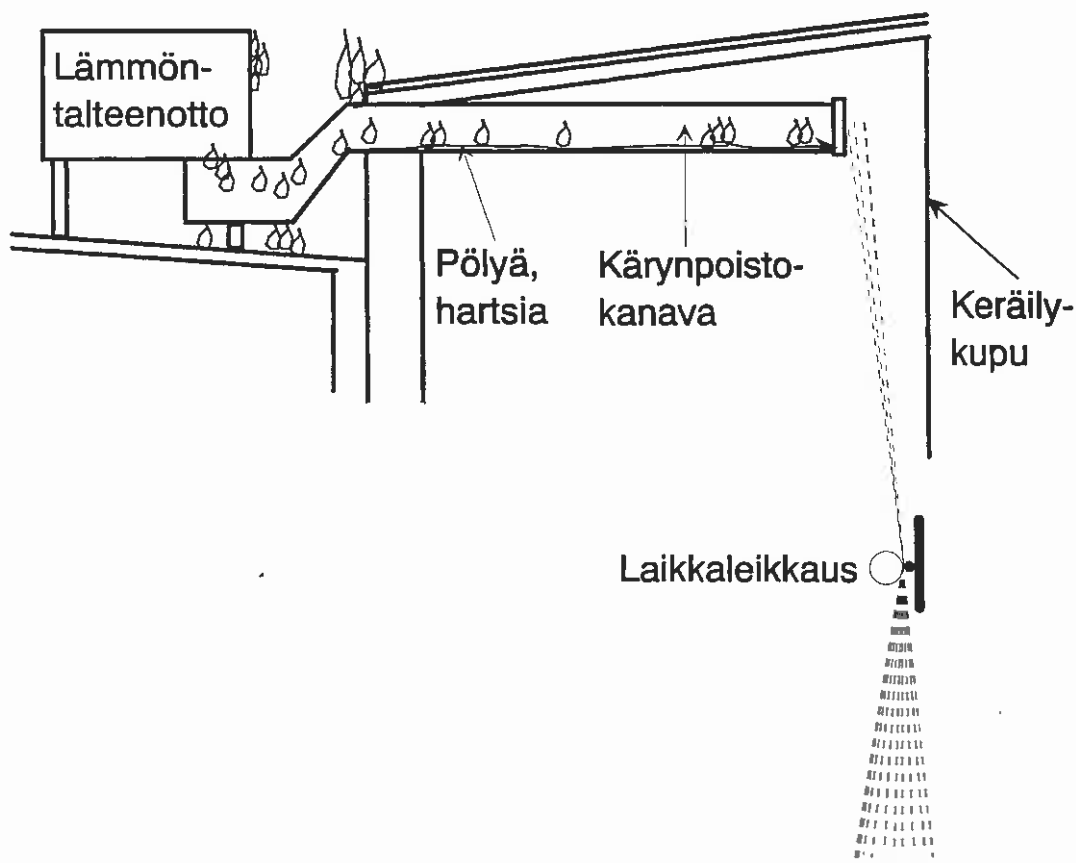
Tulityöt ovat töitä, joissa esiintyy kipinöintiä, kuten kaasu- ja kaarihitsaus, poltto- ja kaarileikkaus, laikkaleikkaus ja metallien hionta, sekä työt, joissa käytetään kaasuliekkiä, avotulta tai muunlaista lämpöä, josta voi aiheutua palovaaraa. Tulityöt aiheuttavat vuosittain huomattavan määrän tulipaloja ja vastaavasti huomattavia taloudellisia menetyksiä.

Tulitöistä aiheutuvien tulipalojen syyt voidaan ryhmitellä seuraavasti (Teollisuusvakuutuksen suojeluohje, 1994):

- laikkaleikkauskipinät
- poltto- ja kaarileikkauskipinät
- hitsauskipinät
- hitsattavan tai työstettävän kappaleen johtama kuumuus
- hitsauslaitteet
 - takaisku ja palo asetyleenipulloventtiilissa
 - kaarihitsauksessa paluuvirta sekä maavuodot hitsauskaapeleista
- hitsauskaasuräjähdykset
 - palamatta jääneet kaasut
 - asetyleenikehitin
- nestekaasupolttimen ja avotulen aiheuttama kuumuus.

Tulityöpaikan välittömässä läheisyydessä tapahtuvat syttymiset havaitaan usein heti ja ryhdytään sammutustoimenpiteisiin. Paikalla on silloin silminnäkijöitä ja syttymiskohta on melko selvä. Tulipalo voi kuitenkin myös syttyä monta tuntia työn päättymisen jälkeen joko tulityöpaikan läheisyydessä tai kaukana siitä. Tulityön aiheuttamat kipinät voivat lentää huomattavan kauan, jopa kymmenien metrien päähän, ja sytyttää siellä tulipalon. Huolimattomuus on usein osatekijä tulityöonnettomuuksissa, mutta vaikka suojaustoimenpiteet tehdään tulityöluvan mukaisesti, tulipalo voi olla työn seurauksena (Hölemann ja Worpenberg 1992, 1994).

Esimerkkinä tulityökipinöiden aiheuttamasta tulipalosta ja pitkästä lentomatkasta esitetään seuraava teollisuuspallo (Kallioniemi ja Laamanen 1995). Korjaustyön yhteydessä käytettiin laikkaleikkuria kahden mutterin halkaisemisessa. Tulityöpaikan alla oleva tila oli kasteltu vedellä tulityöluvan mukaisesti, tilassa oli tulityövartija töiden aikana ja kohteeseen oli selvitetty paineellinen paloletku. Laikkaleikkurin kipinäsuihku suunnattiin työn aikana alaspäin, mutta osa kipinöistä lensi noin 6 metriä leikkauskohtaa korkeammalla olleeseen keräilykuvun kärynpoistokanavaan, jonka seinille kertyneet hartsi ja pöly syttyivät palamaan (kuva 5.2). Tulityön tekijät aloittivat alkusammutuksen heti havaittuaan kipinöitä kuvun sisäpuolelta, mutta siitä huolimatta tulipalo levisi kattorakenteisiin. Palon seurauksena tuhoutuneen katon pinta-ala oli 4950 m². Vahingot olivat mittavat.



Kuva 5.2. Laikkaleikkauskipinä sytytti palon kärynpoistokanavassa, josta se eteni lämmöntalteenottolaitteeseen ja kattorakenteisiin (Kallioniemi ja Laamanen 1995).

Mikäli tulityötä epäillään palonsyöksi, selvitetään minkälaista tulityötä on tehty, missä, mihin aikaan sekä työn kesto. Syttymiskohta varmistetaan palojälkien perusteella. Jos on epäiltävissä, että tulityöpaikalta lämpö on johtumalla siirtynyt muualle ja sytyttänyt tulipalon, niin tarvittaessa puretaan tulityöpaikan lähiympäristö palojälkien tutkimiseksi. Tulityöpaikka ja ympäristö mitataan ja kartoitetaan tarkasti sekä selvitetään kipinäsuihkujen mahdollisuuksia osua

syttymiskohtaan. Tarvittaessa voidaan tehdä rekonstruktiokeiteita samalla tulityövälineellä, samankokoisessa paikassa ja samalla ensiksi syttyneellä materiaalilla. Kipinöiden energiajakaumasta, kokojakaumasta, kantamasta tai kyvystä sytyttää erilaisia materiaaleja eri tilanteissa ei ole kovinkaan paljon tieteellisiä tutkimustuloksia, joten paikan päällä tehdyillä selvityksillä on näissä tapauksissa ratkaiseva asema.

5.5.2 Muut

Kynttilät käsitellään kohdassa 5.2.4 valaistus

Sähkökipinät käsitellään kohdassa 5.3 sähkötekniiset syyt

5.6 TUPAKOINTIIN JA TUPAKOITSIJAN VÄLINEISIIN LIITTYVÄT SYYT

5.6.1 Yleistä

Tupakointiin liittyvät mahdolliset syttymissyyt voidaan jakaa kahteen ryhmään, kytevät (tupakka, useimmiten savuke) ja liekillä palavat (tulitikut tai tupakansytytin). Tupakoitsija on tavallisin tupakointiin liittyvä palonsyö. Hän on nukahtanut joko vuoteeseen tai pehmustetulle kalusteelle, jolle häneltä putoaa palava savuke, mikä sytyttää kytevän palon. Kytevä palo saattaa leimahtaa liekkeihin, mutta näin ei aina käy. Aikaa kytevän savukkeen putoamisesta kalusteelle tämän liekehtivään paloon leimahtamiseen saakka voi kulua 20 minuutista useaan tuntiin (Babrauskas ja Krasny 1986). Savukkeen lisäksi tulitikut ja sytyttimet ovat mahdollisia tulipalon aiheuttajia. Pehmustettujen kalusteiden syttymisominaisuudet saattavat olla erilaisia eri syttymislähteillä. Kytevästä savukkeesta tuskin syttyvä tekstiili saattaa syttyä helposti pienestä liekestä.

5.6.2 Savukkeet

Savuke on ehkä tunnetuin esimerkki kytevästä palamisesta. Vaakasuorassa vapaassa tilassa olevan savukkeen palamisnopeus on noin 0,1 mm/s kun sen läpi ei imetä ilmaa. Jos kalusteen päällä oleva savuke peitetään tekstiilinkappaleella, paperilla tms., savuke saattaa kyteä 45 ... 60 min ennen kuin se on palanut loppuun (Brannigan et. al. 1980). Savukkeen hehkuvan palamisvyöhykkeen lämpötila on tyypillisesti noin 600 °C.

Savukkeiden aiheuttamien tulipalojen syttymiskohta on useimmiten vuode, pehmustettu kaluste tai roskakori. Mattojen, paperiarkkien tai lehtien syttyminen niiden päällä olevasta vapaasti kytevästä savukkeesta on harvinaisempaa. Peittämättömän savukkeen aiheuttama vaurio vaakasuoralla pinnalla rajoittuu usein paikalliseen, lievään hiiltymään. Jos materiaali on sulavaa, savuke saattaa polttaa itsensä läpi ja pudota tason alapuolelle olevaan paikkaan, jossa voi olla herkemmin syttyvää ainetta.

Pehmusetut kalusteet koostuvat monesta eri tekstiilikerroksesta ja -materiaalista (päällismateriaalit, välikerrokset ja täytemateriaalit), joiden palamisominaisuudet saattavat vaihdella huomattavasti. Materiaaliyhdistelmien palo-ominaisuudet voivat olla erilaiset kuin erillisten aineiden. Jotta kalusteeseen syttyisi kytevästä savukkeesta kyöpalo, materiaalin on oltava huokoinen tai hienojakoinen. Villa, nailon, polyesteri ja monet muut synteettiset muovit sulavat pikemminkin kuin kytevät. Selluloosapohjaiset materiaalit, kuten puuvilla ja pellava, alkavat kyteä ja syttyvät savukkeesta. Erilaisilla palonsuoja-aineilla pyritään parantamaan tekstiilimateriaalien paloturvallisuutta.

Kalusteen todennäköisyys syttyä savukkeesta on huomattavasti suurempi, jos savuke on peitetty tai ainakin kiinteästi koskettaa tekstiiliin. Tällainen tilanne on esimerkiksi savukkeen ollessa peitossa huonekalun istuimen ja selkänöjan välisessä raossa. Kytevät savukkeet voivat myös aiheuttaa paloja tuhkakuppeissa ja roskakoreissa.

Jos kytevä palo kehittyy liekehtiväksi, palon jälkeen tilanne on samanlainen kuin palon alettua liekehtivänä. Syttymiskohdan sijainti ja muut havainnot, kuten asukkaiden tupakointitavat ja savu- tai hajuhavainnot, voivat antaa viitteitä kytevästä savukkeesta syttymissyynä. Jos palo on sammunut itsestään tai sammutettu ennen liekehtimistä, kytevän palon voi tunnistaa osittain hiiltyneestä vuoteen patjasta tai kalusteen pehmusteesta. Kytevä palo aiheuttaa vain vähän nokea verrattuna liekehtivään paloon, ja nokijäljet ovat syttymiskohdan lähellä. Kytevä palo sytyttää harvoin palavia nesteitä tai jähmeitä aineita, elleivät nämä kosketa välittömästi kyöpesäkettä (Brannigan et. al. 1980). Ellei kytevä palo ole levinnyt kovin pitkälle, savukkeesta saattaa olla vielä jälkiä. Usein savukkeen jäännökset ovat kuitenkin hävinneet esimerkiksi kytevään kohtaan suunnatun sammutusveden vaikutuksesta.

Kytevä palo synnyttää huomattavan määrän hiilimonoksidia ja muita vaarallisia kaasuja. Syntyneet hiilimonoksidipitoisuudet nousevat usein hengenvaaralliselle tasolle. Huomattavassa osassa palokuolemia kuolinsyy on hiilimonoksidimyrkytys, joka on johtunut tupakoitsijan aiheuttamasta palosta, vertaa luku 11, palokuolemat. Paloruumiin sijainnista ja asemasta voidaan usein päätellä, onko kuolema tapahtunut unessa vai onko uhri yrittänyt poistua palavasta tilasta.

5.6.3 Tulitikut

Savukkeita tai muuta roskaa sisältäviin tuhkakuppeihin tai roskakoreihin pannut palavat tulitikut voivat sytyttää kytevän palon. Se voi leimahtaa, jos astian sisällön lämpötila nousee niin paljon, että se voi sytyttää ympäristössä olevan materiaalin. Näin syttynyt tulipalo edellyttää ainakin, että 1) kytevä palo syttyy esim. tupakantumpeissa, 2) lämpötila kytevän palon ympäristössä nousee riittävästi ja 3) lähiympäristössä on lämmöstä sytyvää palavaa materiaalia. Vaikka varmasti todettaisiin, että tuhkakuppiin on asetettu palava tulitikku, se ei vielä ole varma osoitus syttymissyystä.

Kalusteille epähuomiossa pudotetut palavat tulitikut todennäköisesti joko sammuvat tai sytyttävät liekehtivän palon lähes välittömästi. Tällaisen palon

havaitseminen jo varhaisessa vaiheessa on paljon todennäköisempää kuin kytevän savukkeen toteaminen.

Lasten tulitikkuleikit ovat myös tulipalojen syitä. Leikkipaikka on usein komerossa tai vastaavassa, jossa lapsi kaikessa rauhassa voi tehdä kokeilujaan "salaisessa" paikassa. Jos päädytään siihen, että palo on saanut alkunsa komerossa, eikä muita mahdollisia syytymislähteitä ole tiedossa, lapsen tulitikkuleikki saattaa olla palonsyy.

Massiivisten esineiden sytyttäminen tulitikulla on vaikeaa, esimerkiksi tuolin puisen käsinojan sytyttäminen pelkällä tulitikulla on lähes mahdotonta. Tahallaan sytytetyissä paloissa on useimmiten käytetty sytykkeenä jotakin muuta helpommin syttyvää ainetta, esimerkiksi rutistettua sanomalehtipaperia. Savukkeita ja tulitikkuja on myös käytetty yhdistelmänä viivästettynä sytytyksenä. Jos tulitikkuja on käytetty tahallisessa sytyttämisessä, niitä on mahdollisesti kulunut useampia, ja niiden jäännöksiä voi löytyä lattialta palojäännösten kaikkein alimmasta kerroksesta.

5.7 TAHALLAAN SYTYTETYT PALOT

5.7.1 Tahallaan sytytettyjen palojen tutkiminen

Poliisi suorittaa asiassa esitutkinnan, jos on syytä epäillä palon syttymiseen liittyvän rikos tai poliisiin tai muun viranomaisen tutkintavelvollisuus määräytyy muun lainsäädännön perusteella (vertaa luku 1).

5.7.2 Tuhopoltot ja -polttajat

5.7.2.1 JOHDANTO

Paloa sytyttävien henkilöiden motiiveja ja taustoja on selvitetty eri maissa tarkoituksena löytää niistä yhteisiä piirteitä. Näitä tietoja voidaan käyttää ennaltaehkäisevässä toiminnassa ja tahallisesti sytytettyjen palojen selvittämisessä.

Tuoreimmat suomalaiset selvitykset ovat Rautaheimon (1991) ja Heikkosen (1994) tekemiä. Lisäksi Räsänen (1995) on tutkinut Oulun Psykiatrian klinikassa mielentilatutkimuksessa vuosina 1975 - 1993 olleiden murhapolttajien otosta (n=98).

Rautaheimon aineistona on ollut kaikki ne henkilöt, jotka ovat Helsingissä vuosina 1983 - 1990 syyllistyneet murhapolttoon ja jääneet siitä kiinni. Selvityksessä on mukana ainoastaan ns. selvät jutut, 150 henkilöä ja 303 sytytettyä paloja. Tapauksista on tilastoitu ne muuttajat, jotka ovat olleet selvitettävissä kaikkien henkilöitten osalta. Muuttajia on selvityksessä yhteensä 54.

Heikkosen aineistona on 1000 palotapausta, jotka oli arvioitu tahallaan sytytetyiksi vuosina 1990 - 1993. Tekijätiedot on 439 tapauksesta, ja niissä oli yhteensä 537 tekijää. Otos kattoi maantieteellisesti koko maan ja tapaukset vaihtelivat kooltaan roskalaatikon polttamisesta suurpaloon. Paloista 84 - 86 % oli arvioitu tahalliseksi, 12 - 13 %:ssa sytymissyö oli tuntematon ja 2 - 3% oli arvioitu muuksi syyksi.

Heikkosen esityksessä tuhopolttokäsitteeseen sisältyvät kansainvälisesti käytetyn määritelmän mukaisesti kaikki tahalliset palonsyyt kuten silloisen rikoslain tarkoittama murhapoltto (rikoslain uudistuksessa 1995 murhapoltto muuttui tuhotyöksi, vertaa kohta 1.1), vahingonteko, vakuutuspetos, ilkivalta, lasten leikkiminen tulella tms.

Heikkosen tutkimuksessa arvioidaan, että kaikista tulipaloista tuhopolttoja on 31 %. Arvioon on otettu huomioon ryhmät "tahallinen", "alle 15-vuotiaan aiheuttama", "lasten leikki tulella" sekä 30 % ryhmästä "syy tuntematon".

Seuraavassa esitetään keskeisiä tuloksia näistä selvityksistä. Tekstissä esiintyvät myös käsitteet "varsinaiset pyromaanit" ja "pyromania". Lääketieteellisen määritelmän mukaan (Lääkintöhallitus 1989) pyromaaneiksi kutsutaan niitä murhapolttajia, jotka täyttävät psykiatrisen tautiluokituksen (DSM III R) käytös- ja hillitsemishäiriöihin kuuluvan tuhopolttohimon (3123 C) eli pyromanian diagnostiset kriteerit, joiden kaikkien tulee täytyä:

- Tarkoituksenmukainen ja harkittu tulipalojen sytyttäminen useammin kuin yhden kerran.
- Lisääntyvä jännityksen tunne ennen tulipalojen sytyttämistä.
- Viehtymys, kiinnostus ja uteliaisuus tulipaloihin ja niihin liittyviin piirteisiin (esim. seuraamukset, tulelle altistuminen yms.).
- Voimakkaan mielihyvän, tyydytyksen tai helpotuksen kokeminen sen jälkeen, kun on sytyttänyt tulipalon, ollut sen silminnäkijä tai osallistunut sen sammuttamiseen.
- Tulipalon sytyttämistä ei tehdä taloudellisen hyödyn tavoittelemiseksi, se ei ole poliittisen ideologian ilmaisu eikä sitä ole tehty henkilön elinolojen parantamiseksi eikä se perustu harhaluuloon tai aistiharhaan.

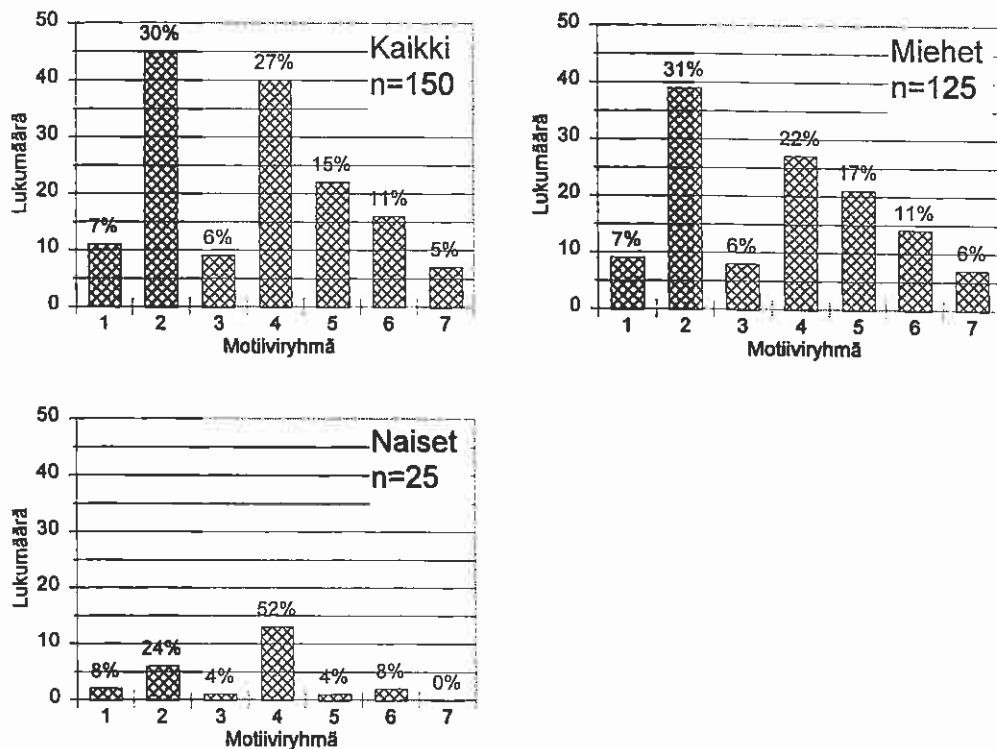
5.7.2.2 HENKILÖT

Motiivi

Tekijät on Rautaheimon selvityksessä jaettu seitsemään motiiviryhmään seuraavasti:

1. vakuutuspetos ja toisen rikoksen tekeminen tai peittäminen
2. kosto, mustasukkaisuus, viha, kateus ja kauna
3. sensaatio ja muu huomion herättäminen (terrorismi, sabotaasi ym.)
4. alkoholistit ja mielisairaat
5. ilkivallantekijät
6. varsinaiset pyromaanit
7. alle 15-vuotiaat lapset.

Kuvassa 5.3 esitetään motiivijakaumat ryhmittäin kaikille henkilöille sekä erikseen miesten ja naisten jakaumat, joissa on silmävaraisesti katsoen tiettyjä eroja toisiinsa verrattuna. Kuitenkin naisten otos on niin pieni, että laskettaessa havainnoille tilastollisia virherajoja, suhteelliset erot eivät ole tämän aineiston perusteella kovinkaan merkittäviä muiden kuin naisten kokonaislukumäärän osalta: joko naiset ovat viisi kertaa miehiä ovelampia murhapolttajia tai heitä on viisi kertaa vähemmän!



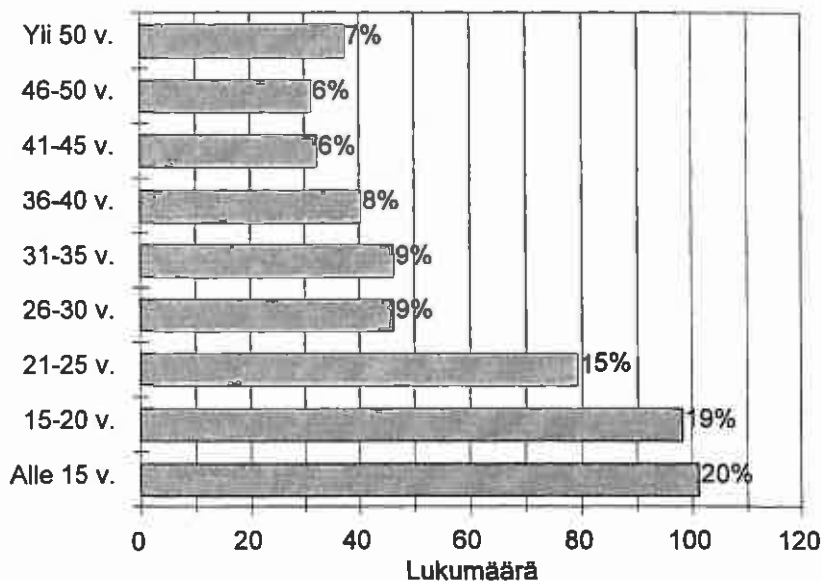
Kuva 5.3. Helsingissä vuosina 1983 - 1990 murhapoltosta kiinni jääneiden henkilöiden motiivijakaumat ryhmittäin (Rautaheimo 1991).

Sukupuoli

Rautaheimon tutkimuksessa henkilömäärästä 125 (83%) oli miehiä ja 25 (17%) naisia. Vastaavat luvut Heikkosella ovat miehiä 89 %, naisia 10 % sekä mies ja nainen 1 %. Tuhopoltto on useimmiten miesten tekemä rikos.

Ikä

Heikkosen selvityksen mukainen tekijöiden ikäjakauma esitetään kuvassa 5.4. Kun jakaumalle lasketaan tilastohajonnasta johtuvat virhejanat, erot 30-vuotiaita iäkkäämmissä ryhmissä eivät ole enää tilastollisesti merkittäviä.



Kuva 5.4. Tekijöiden ikäjakauma Heikkosen (1994) mukaan, 510 tekijää 1990-1992.

Tahallisten palojen syyttäjät ovat useimmiten nuoria tai nuoria aikuisia. Tekijöistä noin 20 % on ollut alle 15-vuotiaita, 30 % alle 18-vuotiaita, 40 % alle 20-vuotiaita ja 55 % alle 25-vuotiaita. Tutkimusjakson aikana alle 25-vuotiaita oli Suomen koko väestöstä noin 30 %.

Tutkimusajanjaksona 1990 - 1993 suurin muutos tekijöiden lukumäärän suhteellisessa vuosijakaumassa tapahtui alle 15-vuotiaiden ryhmässä, jonka osuus nousi 13 %:sta vuonna 1990 28 %:iin vuonna 1993 (tilastollisesti merkittävä).

Rautaheimon aineiston ikäryhmäjakauma on saman suuntainen. Miehillä näkyy kaksi huippua, ikäryhmät noin 20-vuotiaat sekä matalampi huippu, noin 30-

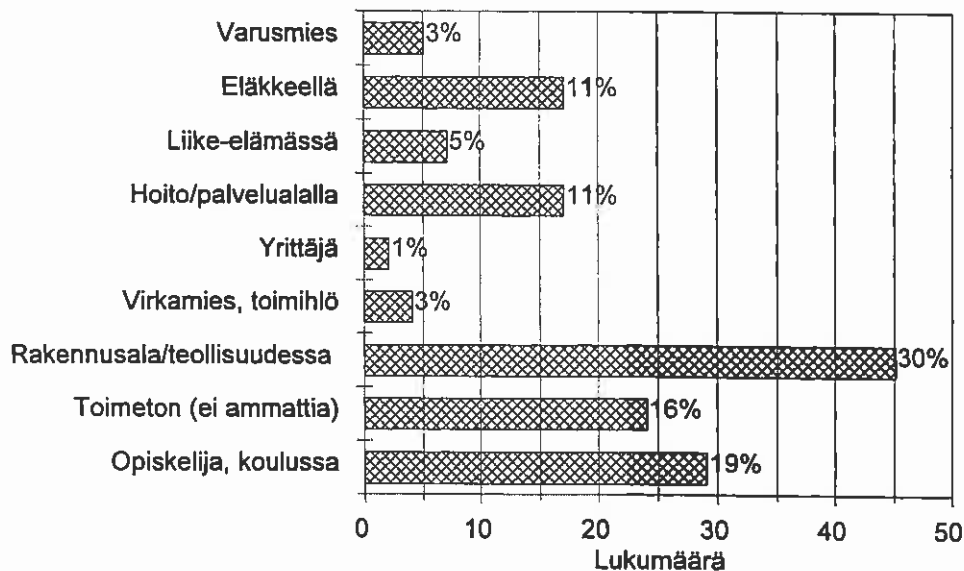
vuotiaat. 20-vuotiaiden ryhmässä ovat erityisesti ryhmät 3 (sensaatio), 5 (ilkivalta) ja 6 (varsinaiset pyromaanit) edustettuina. 30-vuotiaiden ryhmässä valtaosa kuuluu ryhmään 4 (alkoholistit ja mielisairaat). Naisten enemmistö on kuulunut noin 30-vuotiaiden ryhmässä luokkaan 4 (alkoholistit ja mielisairaat).

Lapsuus, koulutus

Rautaheimon selvityksen mukaan tekijän kotioloit lapsena ovat yleensä olleet huonot tai keskinkertaiset. Koulusivistys on keskimäärin ollut alhainen, vain peruskoulun ala-asteen tai entisen kansa- tai kansalaiskoulun käyneiden osuus oli 44 % ja yläasteen tai entisen keskikoulun käyneiden osuus 19 %.

Ammatti ja työssäolo tekohetkellä

Murhapolttajien jakautuminen yhdeksään ammattiryhmään tekohetken ammatin mukaan Rautaheimon selvityksessä on esitetty kuvassa 5.5.

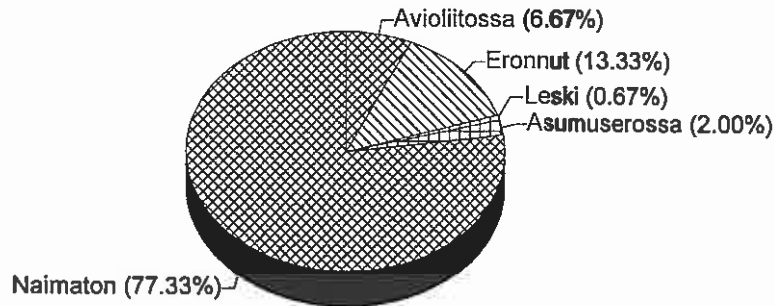


Kuva 5.5. Murhapolttajien ammatti tekohetkellä ryhmittäin (Rautaheimo 1991).

Tekohetkellä työsuhteessa oli kaikista henkilöistä 34 %, joista puolet oli vakituksessa työsuhteessa ja puolet tilapäistöissä. Työttömiä oli tekohetkellä 41 %, koululaisia ja opiskelijoita 21 % ja varusmiehiä 4 %.

Aviosuhde

Murhapolttajien aviosuhdejakauma Rautaheimon selvityksessä esitetään kuvassa 5.6.



Kuva 5.6. Murhapolttajien aviosuhdejakauma tekohetkellä (Rautaheimo 1991).

Sairaudet ja itsemurhataipumus

Merkittävä fyysinen tai psyykinen sairaus oli Rautaheimon selvityksessä todettu noin 25 %:lla murhapolttajista. Psykkisesti sairaita oli 19 %.

Kaikista henkilöistä oli itsemurha-alttiutta todettu 14 %:lla. Nämä jakautuvat sukupuolen mukaan siten, että naisilla itsemurhataipumusta on ollut 44 %:lla ja miehillä vain 7 %:lla. Naisten enemmistö (52 %) kuului motiiviryhmään 4 (alkoholistit, mielisairaat). Naisten tekemän murhapolton kohde on hyvin usein ollut oma asunto ja motiivi itsemurhan tekeminen.

Mielentilatutkimuksessa olleet murhapolttajat

Räsänen (1995) on tutkinut Oulun Psykiatrian klinikassa mielentilatutkimuksessa vuosina 1975 - 1993 olleiden murhapolttajien otosta (n=98) käyttämällä verrokkiaineistona henkirikoksen tekijöitä (n=55). Seuraavassa esitetään tutkimuksen tiivistelmästä sen keskeisiä tuloksia.

Murhapolttajat erosivat henkirikokseen syyllistyneistä naimattomuuden, vähäisen koulutustaustan, vakinaisesta ansiotyöstä poissaolon ja aikaisempien psykiatristen hoitojen suhteen. Murhapolttajilla esiintyi henkirikokseen syyllistyneitä yleisemmin alkoholiongelmia, taipuvaisuutta itsemurhaan ja psyykkisiä sairauksia. Murhapolttajat olivat usein syntyäkeettomia syytteenalaiseen rikokseen nähden.

Molemmissa ryhmissä kokonaisälykkyyden ja verbaalisen sekä ei-verbaalisen älykkyyden keskiarvot olivat heikkoa keskitasoa.

Murhapolttajanuoret käyttivät enemmän terveydenhuollon palveluja psyykkisiin oireisiinsa kuin väkivaltarikokseen syyllistyneet nuoret. Sairaalahoitoon yleisin syy oli psykoottisuus, kun taas avoterveydenhuollossa olivat yleisimpiä univaikeudet, alkoholin liikkäyttö, itsetuhoisuus ja aggressiivisuus.

Kvalitatiivinen tutkimusaineisto koostuu murhapolttajien omista teksteistä, jotka kuvaavat sitä emotionaalista olotilaa, jossa murhapolttaja muodostuu ratkaisuvaihtoehdoksi. Tutkimusmetodi oli kvalitatiivinen tekstin sisällön analyysi. Persoonallisuudesta tehdyistä havainnoista 68 % viittasi suoraan murhapolttajan itsetuhoisuuteen. Toiseksi suurin itsetuhoisuuteen viittaava syy (10 %) oli ongelmat läheisten ihmisten kanssa. Parisuhdevaikeudet sekä sosiaalisen tuen puuttuminen aiheuttivat yhtä paljon itsemurha-ajatuksia, eli 7,7 % havainnoista. Väkivaltaan johtavia havaintoja tehtiin murhapolttajista vähän.

Rikollinen käyttäytyminen

Reilusti yli puolella henkilöistä oli Rautaheimon selvityksessä todettu rikollista käyttäytymistä jo ennen murhapolttorikosta. Rikoksista muodostivat omaisuusrikokset valtaosan. Aikaisempia murhapolttajia oli kaikista 8 %:lla.

Henkilön jäätyä kiinni murhapoltosta 40 % heistä oli syyllistynyt uusiin omaisuusrikoksiin, 9 % väkivaltarikoksiin, 7 % huumoririkoksiin, 9 % ilkivaltarikoksiin ja 7 % uuteen murhapolttoon. Viimeiset ovat valtaosin kuuluneet motiiviryhmään 6 (varsinaiset pyromaanit).

Rikostoverit

Rautaheimon selvityksessä 70 % kaikista murhapolttajista oli ollut tekoa tehdessään yksin ja 30 %:lla oli ollut rikostoveri. Heikkosen aineistossa tekijä oli ollut yksin 82 % tapauksista ja rikostoveri oli ollut mukana 18 % tapauksista.

Pääsääntöisesti tuhopolttaja on yksin tehty rikos.

Tulipalojen lukumäärä

Taulukossa 5.2 esitetään henkilöiden ja tulipalojen jakauma motiiviryhmittäin Rautaheimon selvityksessä.

Taulukko 5.2. Henkilöiden ja tulipalojen jakauma motiiviryhmittäin (Rautaheimo 1991).

Motiiviryhmä	Henkilöiden lukumäärä	Tulipalojen lukumäärä	Suhteellinen osuus kaikista paloista (%)
1	11	11	3,6
2	45	51	16,8
3	9	17	5,6
4	40	52	17,2
5	22	42	13,9
6	16	123	40,6
7	7	7	2,3

Motiiviryhmään 6 (varsinaiset pyromaanit) kuuluvat 16 henkilöä (11 %) olivat siis sytyttäneet 40 % paloista, keskimäärin 8 paloa henkilöä kohden. Suurin yksittäisen henkilön sytyttämä palomäärä oli 30. Karkeasti ottaen ryhmät 1 (vakuutuspetos ym.), 2 (kosto ym.), 4 (alkoholistit ja mielisairaant) ja 7 (lapset) sytyttävät yhden palon henkilöä kohden, ryhmät 3 (sensaatio ym.) ja 5 (ilkivallantekijät) kaksi paloa ja 7 (varsinaiset pyromaanit) useita paloja.

Murhapolttaajan suhde palokohteeseen

Taulukossa 5.3 on esitetty henkilön suhde poltettuun kohteeseen Rautaheimon selvityksessä.

Taulukko 5.3. Henkilöiden suhde polttamaansa kohteeseen (Rautaheimo 1991).

Kohde	Tapausten lukumäärä	Suhteellinen osuus kaikista paloista (%)
Oma asunto	32	11
Oma asuintalo (esim. kerrostalon ullakko- tai kellaritila)	47	16
Tuttavien asunto tai asuintalo	50	17
Oma tai entinen työpaikka	10	3
Sattumanvarainen kohde	144	48
Muu tuttu kohde	20	7

Hieman yli puolet tapauksista sisälsivät yhteyden polttajan ja kohteen välillä. Usein esiintyvä yhteys polttaja - kohde oli mies - entisen naisystävän asunto tai asuintalo. Naisilla oli kohteena usein oma asunto.

Syöttäjän käyttäytyminen sytytyksen jälkeen

Taulukossa 5.4 on esitetty murhapolttaajan käyttäytyminen palon sytytyksen jälkeen Rautaheimon selvityksessä.

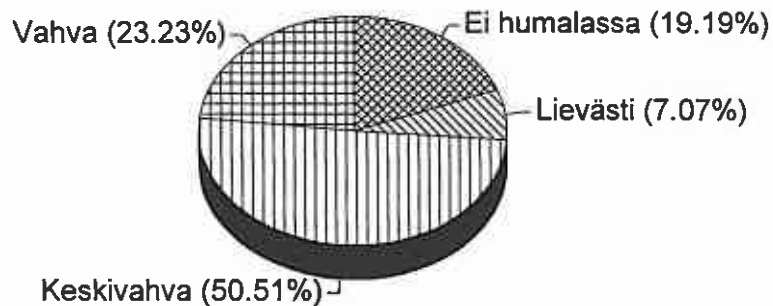
Taulukko 5.4. Murhapolttaajan käyttäytyminen palon sytytyksen jälkeen (Rautaheimo 1991).

Toiminta	Tapahtumien lukumäärä	Suhteellinen osuus (%)
Jäänyt palopaikalle	62	20
Poistunut paikalta	158	52
Poistunut, jonka jälkeen palannut	60	20
Käynyt myöhemmin paikalla	5	2
Osallistunut itse sammutustöihin (yliaktiivisuus)	5	2
Ilmoittautunut itse poliisille	13	4

Näistä tapauksista syöttäjä on ollut palon aikana paikalla neljä kertaa kymmenestä, joko alusta alkaen tai jonkun hetken päästä. Tähän asiaan on kiinnitettävä huomiota palon aikana ja tehtävä havainnot palopaikalla olevista ihmisistä. Tämä koskee erityisesti poikkeavasti käyttäytyviä henkilöitä, mm. ”yliaktiivisia”, alkoholin, huumeen tai lääkkeen vaikutuksen alaisia.

Tekohetken humalatila

Rautaheimon selvityksen kaikkien henkilöiden humalatila, johon on myös yhdistetty muiden päihteiden käyttö, on esitetty kuvassa 5.7. Tässä päihtymystila on jaettu neljään ryhmään.



Kuva 5.7. Murhapolttajien tekohetken humalatasoli, alkoholi ja muut pähhteet yhdistettynä (Rautaheimo 1991).

Noin 75 % sytyttäjistä on ollut pähhtynyt tekohetkellä. Missä määrin henkilö on hakenut rohkeutta humalatasolista sytyttämistä varten ja missä määrin humalatasoli on laskenut henkilön arvostelukykä ennen sytyttämistä, jää selvityksessä avoimeksi kysymykseksi.

5.7.2.3 AJANKOHTA

Vuodenaika

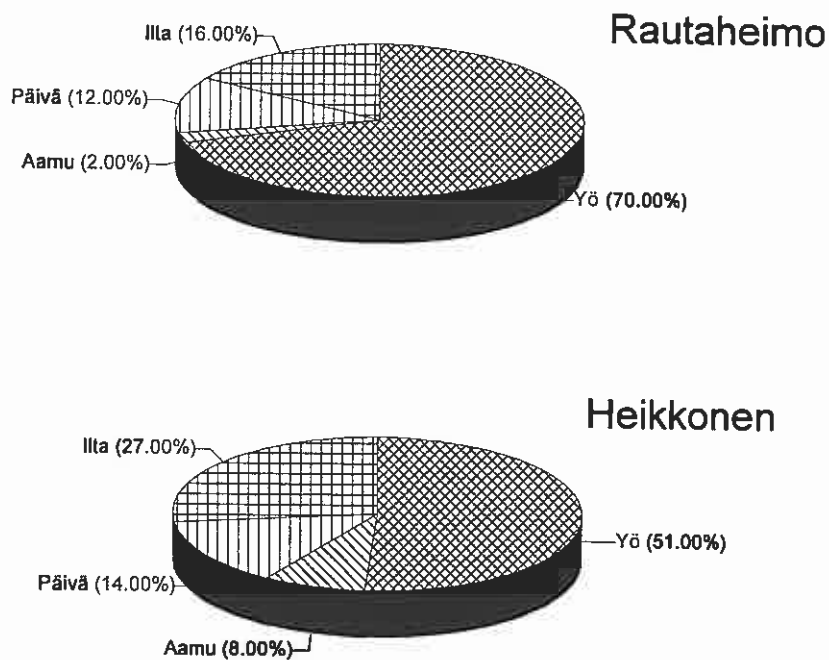
Heikkosen tutkimuksen vuodenaikajakaumassa tuhopoltot näyttivät painottuvan kesäkuukausiin (33 %). Syksyllä oli sytytetty 25 %, keväällä 23 % ja talvella 19 % paloista. Rautaheimon tutkimuksessa ei ole suuriakaan eroja, talvella oli sytytetty eniten (29 %) ja kesällä vähiten (21 %) paloista. Ero saattaa johtua siitä, että Rautaheimon aineisto koostui rikoslain tarkoittamasta murhapolttorikoksesta kiinni jääneistä henkilöistä.

Viikonpäivä

Rautaheimon jakauma viikonpäivien suhteen osoitti tasaista nousua alkaen sunnuntaista ja maanantaista (n. 8 %) päättyen viikonloppuun, perjantaina 18 % ja lauantaina 28 %. Vilkkain aika oli yö perjantai-lauantai. Heikkosen tutkimuksessa palot keskittyivät myös viikonloppuihin (lauantai 20 % ja sunnuntai 17 %), mutta jakauma on tasaisempi kuin Rautaheimon (muut päivät 11 - 12 % paitsi torstai 17 %).

Vuorokaudenaika

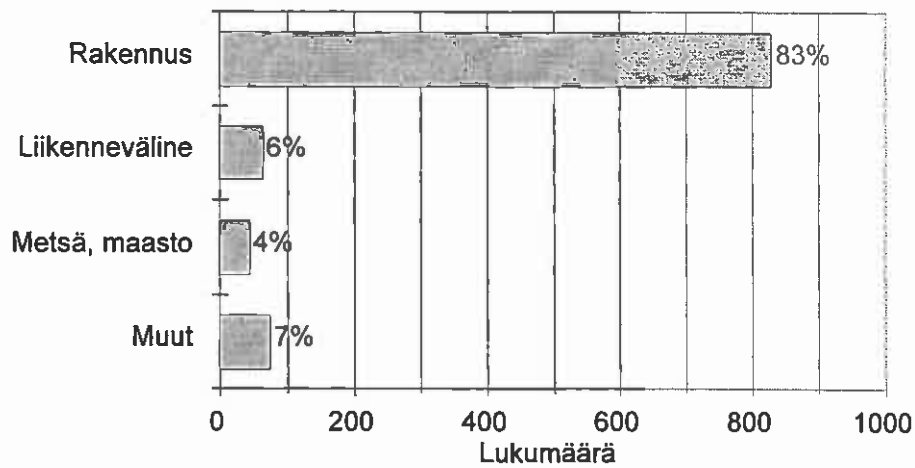
Vuorokaudenaikojen suhteen näkyi selviä eroja (kuva 5.8). Sekä Heikkosen että Rautaheimon aineiston mukaan yö (00...06) ja ilta (18...24) ovat yleisimmät ajankohdat.



Kuva 5.8. Murhapolttojen jakautuminen eri vuorokauden aikoihin (Rautaheimo 1991 ja Heikkonen 1994).

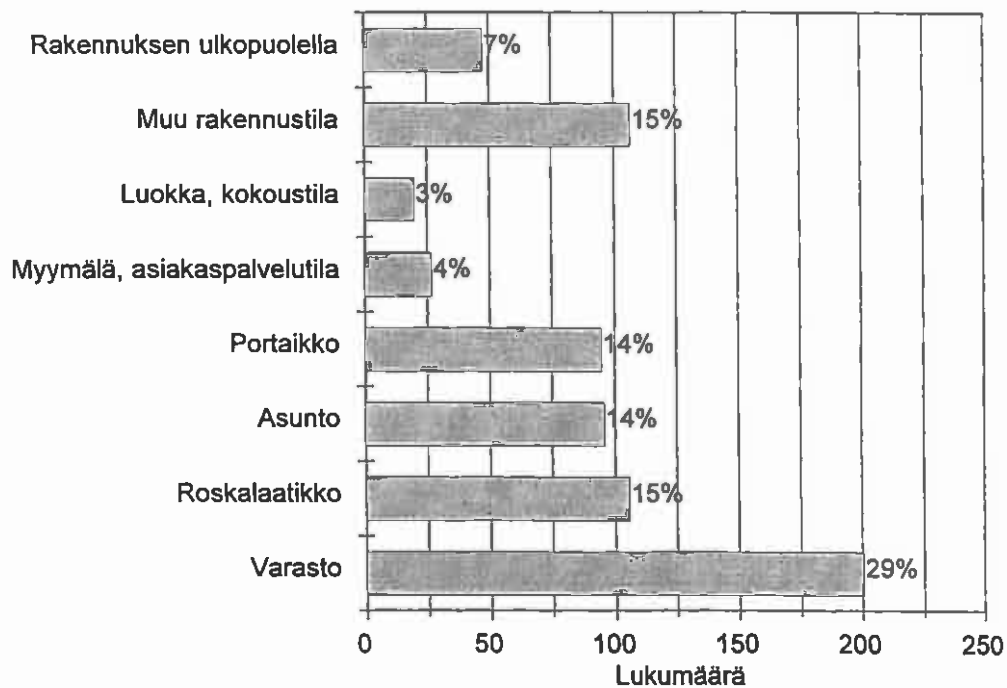
5.7.2.4 KOHTEET

Kuvassa 5.9 esitetään Heikkosen tutkimuksen kohdejakauma, jonka mukaan valtaosa tuhopoltoista kohdistui rakennuksiin. Kohteista 818 eli 86 % oli käytössä ja loput 14 % oli autiona. Heikkonen painottaa, että käsitys autiotaloista yleisinä tuhopoltto-kohteina ei tämän valossa pidä paikkansa.



Kuva 5.9. Palokohteitten jakauma Heikkosen (1994) mukaan.

Rakennustilajakauma palon alkamispaikan mukaan esitetään kuvassa 5.10 ja sytytyskohtajakauma kuvassa 5.11.



Kuva 5.10 Rakennustilajakauma, 692 tapausta (Heikkonen 1994).



Kuva 5.11. Sytytyskohtajakauma, 617 tapausta (Heikkonen 1994).

5.7.3 Vertailua ulkomaisiin selvityksiin

Vertailuksi esitetään tuloksia selvityksistä Ruotsissa ja Isossa-Britanniassa.

5.7.3.1 RUOTSI

Anderssonin (1995) selvityksen aineisto on 6104 tahallisesti sytytettyä paloa vuonna 1988, jotka muodostivat noin 40 % palojen kokonaislukumäärästä.

Selvitetyistä tahallisesti sytytettyistä tapauksista selvästi suurin motiiviryhmä oli ilkivalta, 71 %. Seuraavat olivat toiseen rikokseen liittyvät 8 %, lapset ilman aikomusta 7 %, kosto, viha, riita 6 %, mielenhäiriö 6 %. Taloudellisen edun tavoittaminen ilman yhteyttä muuhun rikokseen oli motiivina vain 0,7 % kaikista selvitetystä tapauksissa. Tahallisesti sytytettyjen palojen motiivi jäi tuntemattomaksi 22 % tapauksista.

Sytyttäjistä oli 86 % miehiä (likimain samoin Suomessa). Tahallisesti sytytettyjen palojen aiheuttajien ikäjakaumasta vuosina 1987 - 1991 oli 41 % alle 15-vuotiaita, 18 % 15 - 17-vuotiaita ja 11 % 18 - 20-vuotiaita (alle 20-vuotiaiden osuus kaksinkertainen Suomeen verrattuna).

Motiiviryhmällä ilkivalta oli myös suurin osuus palojen aiheuttamien vahinkojen arvosta, 35 % tunnetuista tapauksista. Osuus on selvästi pienempi kuin ilkvallantekijöiden osuus tapauksista. Lukumääräisesti jättesäiliöt, porraskäytävät,

roskakorit ym. muodostavat suurimman ryhmän, noin 45 %, mutta vain noin 20 % arvosta. Ilkivalta kohdistuu noin 70 %:sesti juuri jättesäiliöihin ym. kohtiin.

Kauna-, viharyhmässä nais- tai miesystävään liittyvät tapaukset erottuivat selvästi huomattavana ryhmänä.

Vakuutuspetoksia esiintyi tutkimuksessa harvoin ja pääosa niistä koski ajoneuvojen vakuutuksia.

Toiseen rikokseen liittyvät tapaukset olivat pääosin autovarkauksia, jonka jälkeen tuli muun omaisuuden varastaminen.

5.7.3.2 ISO-BRITANNIA

Woodward (1995) on käynyt läpi 214 Isossa-Britanniassa vuosina 1992 - 1993 tahallisesti sytytettyä paloa. Selvityksessä on 268 kiinni jäänyttä ja syytettyä henkilöä. Kirjoittaja huomauttaa, että tulos ei ole täysin kattava, koska selvityksen tapaukset muodostavat noin 10 % kaikista brittiläisissä tuomioistuimissa käsiteltävistä tapauksista. Lisäksi tulos ei ole edustava selvitys tahallisesti sytytettyjen palojen motiiveista, sillä selvityksessä on ainoastaan kiinnijääneitä ja syytettyjä henkilöitä.

Motiivijakauma Woodwardin selvityksessä on taulukon 5.5 mukainen.

Taulukko 5.5. 268:n Isossa-Britanniassa vuosina 1992-1993 palon tahallisesta sytyttämisestä syytetyn henkilön motiivijakauma (Woodward 1995).

Motiiviryhmä	Suhteellinen osuus paloista (%)
Viha, kosto, kauna	19
Mielenterveydellisiä ongelmia	17
Alkoholi/huumeriippuvuus	17
Ei selvää motiivia	17
Taloudellisen edun tavoittaminen	9
Muun rikoksen peittäminen	8
Pyromania	3
Terrorismi	2
Halua olla "sankari"	1

Henkilöt jakautuivat iän ja sukupuolen mukaan seuraavasti:

Miehiä yli 18 v.	181 (67 %)
Naisia yli 18 v.	35 (13 %)
Poikia alle 18 v.	47 (17 %)
Tyttöjä alle 18 v.	8 (2 %)

Miessukupuolta tekijöistä oli siis 85 % eli karkeasti sama osuus kuin Suomessa.

Kosto on tässä selvityksissä suurin yksittäinen ryhmä ja 43 % tapauksista kohdistui entiseen nais- tai miesystävään.

Alkoholi- tai huumeriippuvuusryhmässä lähes 90 % syyttäjäistä olivat voimakkaasti juovuksissa tekohetkellä tai arvioitiin alkoholisoituneiksi.

Muun rikoksen peittäminen liittyi kaikissa tapauksissa murtoon tai varkauteen, yhteen tapaukseen liittyi lisäksi murha.

Ei selvää motiivia -ryhmässä valtaosa tapauksista oli ilkivaltaa. Tekijöiden keski-ikä oli alhainen, yli 67 % oli alle 18-vuotiaita.

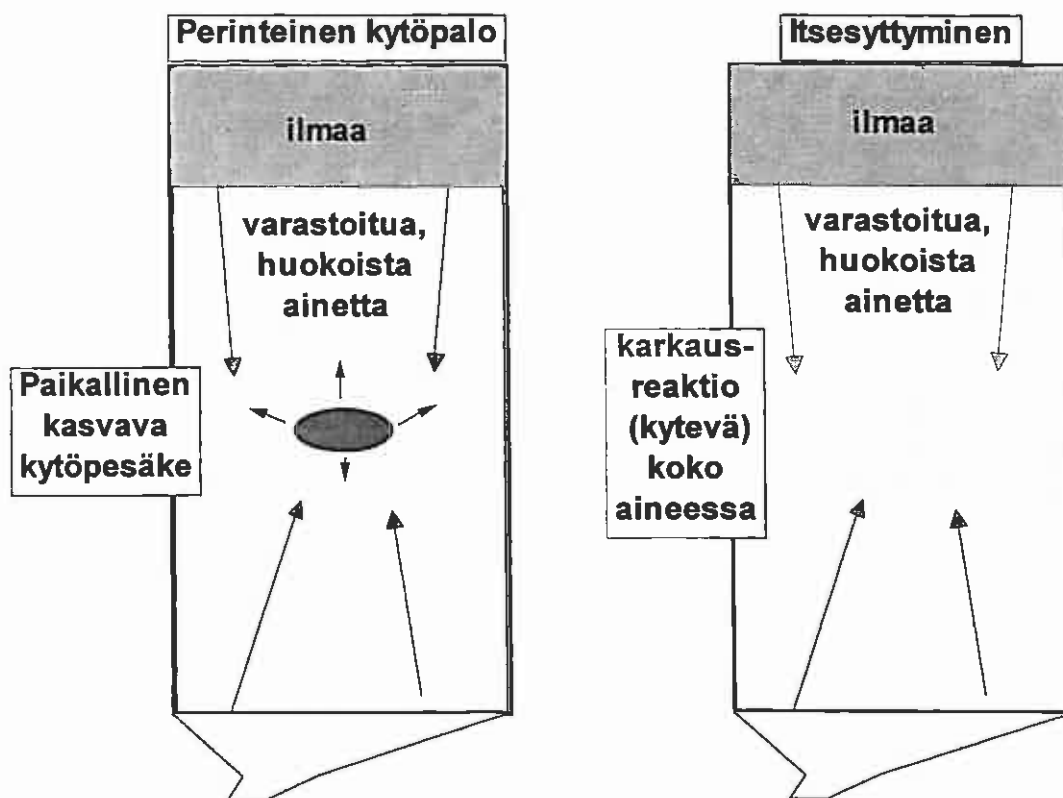
Woodward arvelee, että taloudellisen edun tavoittelu, joka hänen selvityksessään on 6 % kaikista tapauksista, saattaisi olla motiivina noin 20 % kaikista tahallaan sytytetystä paloista Isossa-Britanniassa. Hän perustelee arveluaan sillä, että kiinniotetut mielenhäiriöiset, alkoholistit ja ilkivallantekijät ovat väestön lahjattomimmasta päästä ja teko on huonosti suunniteltu, usein hetken mielijohteesta. Talousrikokseen pyrkivät henkilöt suunnittelevat todennäköisesti tekonsa huolellisemmin, ja jäävät harvemmin kiinni.

5.8 ITSESYTTYMINEN JA SYTTYMINEN KUUMASTA KAPPALEESTA

Itsesyttymisessä palavassa aineessa tapahtuu joko biologisia tai kemiallisia, lämpöä tuottavia reaktioita, joiden vaikutuksesta aineen lämpötila kohoaa. Mikäli kohoaminen on kyllin voimakasta ja lämpöhäviöt pieniä, tämä voi johtaa lämpöräjähdykseen, joka ei ole nimestään huolimatta räjähdys vaan lämpötilan niin voimakas nouseminen, että aine alkaa palaa liekehtien. Itsesyttymisessä syttymisenergia on kokonaan peräisin itse aineesta, eikä mitään ulkopuolista vaikutusta syttymisen alkamiseen tarvita, mikäli syttymisen ehdot on muutoin täytetty.

Kuvassa 5.12b on osoitettu, miten syttyminen lähtee käyntiin huokoisessa aineessa kuten varastosiilossa kuumasta kappaleesta ja itsesyttymällä. Itsesyttymisreaktiossa varastoidussa aineessa reaktiot lämmittävät koko sisältöä, jonka lämpötila kohoaa, ja kiihdyttää reaktioita edelleen Arrheniuksen yhtälön mukaisesti (vrt. 2.1.3). Jos ilmiö on kyllin voimakas, koko siilon sisältö osallistuu

alkavaan paloon, mutta se on voimakkainta keskellä, missä myöskin lämpötila on korkein. Itsesytyvän aineen lämmöntuotto on aineominaisuus. Tietyn ainemäärän tuottama lämpömäärä on verrannollinen aineen kokonaistilavuuteen, mutta lämpöhäviöt verrannollisia sen pinta-alaan. Koska suurella ainemäärällä samanmuotoisena kappaleena tilavuuden suhde pinta-alaan on suurempi kuin pienellä kappaleella, myös sen lämmöntuoton suhde lämpöhäviöihin verrattuna on suurempi. Siten tasapainotilanteessa suuren ainemäärän lämpötila sen sisällä kohoaa korkeammaksi kuin pienen ainemäärän lämpötila samoissa ympäristöolosuhteissa. Siten suurena määränä sama aine voi syttyä itsestään vaikka sitä on voitu säilyttää turvallisesti useampana pienenä eränä.



Kuva 5.12. Varastoidun huokoisen aineen palon syttyminen ja eteneminen: a) kytopesäkkeestä lähiympäristöön ja b) karkausreaktiosta koko siilon sisällössä.

Itsesyttymisen teoria tunnetaan hyvin, ja se kuvaa kokeellisia tuloksia sillä tarkkuudella, että niiden perusteella on voitu tehdä monenlaisia käytännön sovelluksia. Drysdalen kirjassa (1985, luku 8) ja SFPE:n käsikirjassa (Beever 1995) itsesytyksen teoriasta on laajat katsaukset, mutta ilmiön varsinainen hakuteos on Bowesin (1984) itsesytykselle omistettu teos.

Itsesyttymistä kuvataan "lämpöräjähdyksenä", missä energiantuotto kiihdyttää reaktiota, kunnes se "karkaa". Analyttiseen muotoon itsesytyksen teorian puki vuonna 1938 Frank-Kamenetski (1969) Neuvostoliitossa opettajansa Semenovin (idea: van't Hoff 1884) mallin pohjalta kuvaamaan kaasujen syttymistä kuumassa

putkessa. Hän löysi lämmönjohtumisyhtälölle analyyttisen ratkaisun, josta lasketaan itsesyttävän aineen lämpötila, kun aineen sisällä syntyy lämpöenergiaa Arrheniuksen yhtälön (vrt. 2.1.3) mukaisesti. Hän oletti putken reunan pysyvän alkutilan lämpötilassa. Lämmöntuotto kasvaa Arrheniuksen yhtälön perusteella voimakkaasti lämpötilan noustessa (kuva 2.6), mutta lämpöhäviöt vain lämpötilaeroon verrannollisena. Lämpötilan noustessa niin korkealle, että lämmöntuotto tulee yhtä suureksi kuin lämpöhäviöt, ja lämmöntuoton kasvu yhtä suureksi kuin lämpöhäviöiden kasvu, itsesyttävä aine karkaa (syttyy). Se syttyy aineen keskeltä, missä lämpötilat ovat korkeimpia, ja leviää vähitellen koko aineeseen. Karkausehdon määrittelee Frank-Kamenetskin parametri δ , jolle on laskettu erilaisissa tilanteissa teoreettisia arvoja, kuten taulukossa 5.6 on esitetty.

Taulukko 5.6. Frank-Kamenetskin kriittisen parametrin δ -arvoja erimuotoisille kappaleille, kun lämmönsiirto sen ulkopinnasta oletetaan voimakkaaksi, (Beever 1995).

Kappaleen muoto	Mitat	δ
Ääretön tasolevy	paksuus $2r$	0,878
Kuutio	särmä $2r$	2,52
Ääretön sylinteri	säde r	2,00
Pallo	säde r	3,32
Lyhyt sylinteri	säde r , korkeus $2r$	2,76
Lyhyt sylinteri	säde r , korkeus $2l$	$2,00 + 0,841 (r/l)^2$
Suorakulmainen särmiö	särmät $2r, 2l, 2m$	$0,873[1 + (r/l)^2 + (r/m)^2]$
Säännöllinen tetraedri	sisäänpiirretyn ympyrän säde r , särmä $2l = 2\sqrt{6r}$	2,23

Kun tunnemme kappaleen muodon, taulukosta 5.6 voimme valita Frank-Kamenetskin kriittisen parametrin δ ja määrittää kappaleen mittojen perusteella sen tyypillisen mitan r . Kappaleen itsesytyminen riippuu pääasiassa kahdesta tekijästä: sen koosta r sekä itsesyttymisen materiaaliominaisuuksista P ja E , joista jälkimmäinen on Arrheniuksen yhtälössä esiintyvä aktivointienergia. Kriittinen ympäristön absoluuttinen lämpötila T_c (yksikkö K) on se alin lämpötila, jossa itsesyttävän aineen lämmöntuottoreaktio karkaa. Kun kappaleen mitat ja materiaaliominaisuudet tunnetaan, tämä lämpötila on laskettavissa numeerisesti ratkaisemalla yhtälö (Bowes 1984)

$$\ln\left(\frac{\delta T_c^2}{r^2}\right) = P - \frac{E}{RT_c} \quad (21)$$

missä R on yleinen kaasuvakio (8,31 J/mol K). Yhtälöä (21) voidaan käyttää kahdella tavalla:

(a) Kun tunnemme yllä mainitut ominaisuudet, voimme laskea, missä lämpötilassa kappale voisi syttyä. Jos epäilemme palon alkaneen itsesyttymällä, tällä laskennalla voimme tarkistaa, onko se ollut mahdollista. Kun on kyse suurista kohteista, kuten

varastosiiloista tms., ympäristön lämpötilatiedot saa aina Ilmatieteen laitoksen sääpalvelusta. Sisätiloissa tapahtuneesta syttymästä näitä tietoja ei saa niin tarkoin, mutta kriittisen lämpötilan T_c tunteminen auttaa silti usein varmistamaan päättelyä.

(b) Usein emme tunne itsesyttymisestä epäillyn aineen vakioita P ja E . Mittaamalla ne kolmesta samanmuotoisesta, mutta erisuuresta epäillystä aineesta tehdystä kappaleesta, voimme määrittää nämä materiaalisuureet piirtämällä mitatut pisteet yhtälön paperille, jossa y-akselille tulee yhtälön (21) vasen puoli ja x-akselille $1/T_c$. Jos aine tuottaa lämpöä Arrheniuksen yhtälön mukaan, mitatut pisteen lankeavat tässä Arrheniuksen piirroksessa samalle suoralle, jolta P ja E määritetään. Sopiva määritysmenetelmä on esimerkiksi standardin NT Fire 045 (1992) mukainen, jossa uunin lämpötilaa nostetaan tasaisella nopeudella kunnes kappale syttyy itsestään. Tässä menetelmässä käytetään yleensä näytesarjaa, joiden tilavuudet ulottuvat 0,1 ... 5 litraan. Kun materiaaliominaisuudet tunnetaan tai on määritetty, voimme laskea yhtälöllä (21) hyvinkin suurten ainemäärien kuten varastosiilojen ja -kasojen, kuljetuskonttien, rautatievaunukuormien ja jopa laivojen lastiruumien sisältämien ainemäärien itsesyttymismahdollisuuksia.

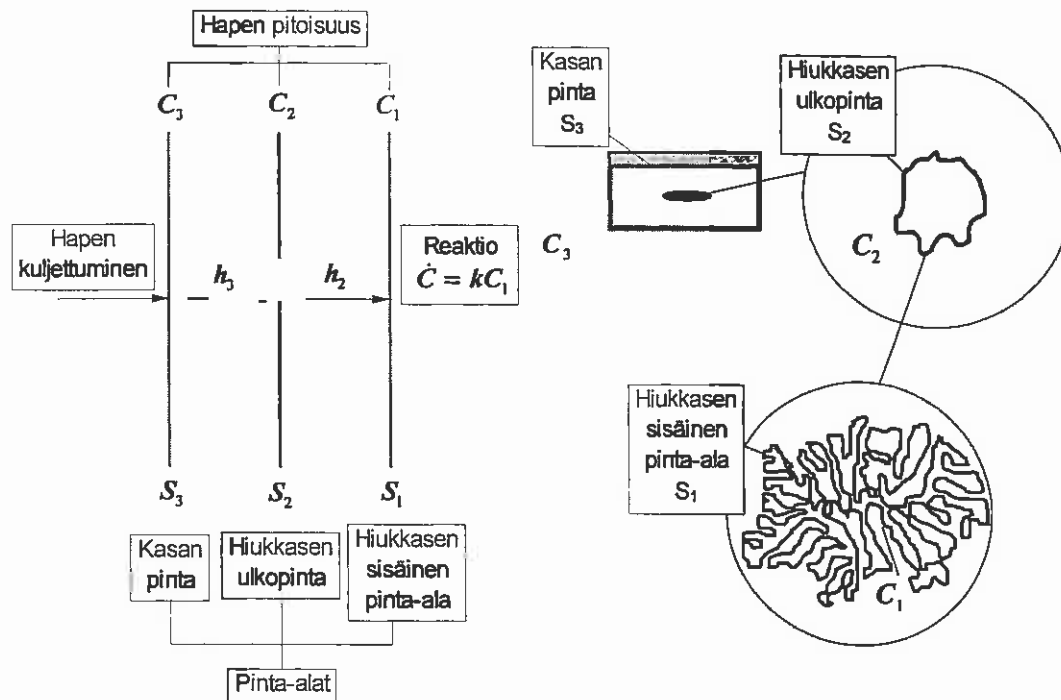
Kuumasta kappaleesta sitä ympäröivä aine syttyy siten, että palaminen leviää kaikkiin suuntiin lähtökohdastaan, jos ainetta on riittävästi. Vaikka näiden kahden ilmiön välillä on suuria eroja, niillä on palavan materiaalin ja esiintymispaikan suhteen niin paljon yhtäläisyyksiä, että ne käsitellään tässä yhdessä. Kipinät ovat pieniä esimerkkejä kuumista kappaleista, ja niitä on sivuttu jo tulitöiden kohdassa (5.5.1).

Kuvassa 5.12a on kaavamaisesti esitetty, miten syttyminen tapahtuu kuumasta kappaleesta huokoisessa, palavassa aineessa. Kun kappaleen lämpötila on riittävän korkea, siihen koskettava aine syttyy palamaan. Mikäli palamisreaktio tuottaa riittävästi lämpöä häviöihin verrattuna, ja mikäli happea on saatavilla, palaminen etenee säteittäisesti syttymispisteestä joka suuntaan. Jos materiaali kykenee palamaan kytämällä (vrt. 2.1.2), palon eteneminen on hyvin sitkeää ja tapahtuu hitaasti vaikka happipitoisuus olisikin melko alhainen. Kuumien kappaleiden kyvystä sytyttää aine Bowden ja Joffe laativat 50-luvulla teorian räjähdysten syttymiselle räjähdysaineessa, jota Thomas täydensi 60-luvulla palotekniikkaan soveltaen. Lopulta Jones (1993) täydentäen samoja ideoita ehdotti itsesyttymisteorian kaltaisesta mallista saatavia kriteereitä, kappaleen lämpötilaa ja kriittistä sädettä, joiden perusteella on arvioitavissa, lähteekö syttyminen etenemään.

Jotta itsesytyminen tapahtuisi rajakerroksessa lähellä lämmitettyä pintaa, pinnan täytyy olla kyllin kuuma lämmittämään aine itsesyttymislämpötilan ylittävään lämpötilaan kauempana kuin sammumisetaisyys d_q kuumasta pinnasta. Sytytetäessä mekaanisilla kipinöillä, jotka ovat hyvin pieniä hehkuvia hiukkasia (< 0,1 mm) joita syntyy kitkaisessa törmäyksessä kahden jähmeän aineen pinnan välillä, tarvitaan vieläkin korkeampia lämpötiloja. Iskukipinöiden lämpötilaa rajoittaa asianomaisen aineen sulamislämpötila. Syttymisen täytyy olla nopeaa, koska hiukkaset jäähtyvät nopeasti. Pyroforiset kipinät - joissa hiukkaset hapettuvat

voimakkaasti ilmassa (esim. alumiini ja magnesium) - voivat saada aikaan hyvin korkeita lämpötiloja ($> 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$) ja sytyttää vaikeastikin syttyvän aineen. Alumiinin ja ferrioksidin (ruoste) välinen termiittireaktio voi syttyä iskusta: esim. iskettäessä ruosteisella teräksellä olevaa alumiinimaalia kovalla esineellä syntyvä kipinäkuuro voi olla hyvin sytyttävä. Pyroforisuudesta enemmän kohdassa (5.9).

Itsesyttymiselle ja kytemiselle alttiita ovat aineet, joilla on "suuri pinta". Kuvassa 5.13 on havainnollistettu, mitä tämä merkitsee ja miten itsesyttynyt tai kytevä palo voi edetä syttymisen tapahduttua. Varsinaiset kemialliset reaktiot tapahtuvat itsesytyvässä aineessa yksityisen hiukkasen pinnalla ja ne ovat valtaosin heterogeenisiä reaktioita, missä hiukkasen pinnalla oleva aine hapettuu pinnan toimiessa katalyyttinä. Kuvan 5.13 voimakkaimmin suurennettu näkymä esittää yhtä hiukkasta, jonka läpimitta voi olla hyvin pieni. Se on kuitenkin molekyyllitasolla katsoen niin huokoinen, että sen sisäinen pinta-ala S_1 saattaa olla monta kertalukua suurempi kuin hiukkasen ulkopinta S_2 . Itsesytyminen käynnistyy, jos suuripintaisen hiukkasen, joka itse voi olla aivan palamatonta, pinnalle kertyy hapettuvaa ainetta kuten rasvoja, öljyjä (vernissa) jne. Hapettumisen nopeus riippuu happipitoisuudesta C_1 hiukkasen sisällä pinnan välittömässä läheisyydessä. Jos palamista jatkuu pitkään, tämä happi loppuu, ja palon eteneminen riippuu siitä, miten uutta happea saadaan. Sitä rajoittaa sen kulkeutumisvastukset vapaasta tilasta kasan pinnalle, sieltä (huokoisen) aineen läpi hiukkasen pinnalle ja lopulta hiukkasen sisään. Lopullinen reaktionopeus määräytyy näiden vastusten yhteisvaikutuksesta sarjakytkennässä sähkötekniikan käsitettä käyttäen.



Kuva 5.13. Hapenkuljetuksen eri vaiheet sekä varsinaisten lämpöä tuottavien reaktioiden tapahtuminen itsesytyvässä tai kytevässä aineessa.

Itsesyttyvät aineet ovat useimmiten huokoisia ja siksi hyviä lämmöneristeitä. Siten syttymisvaiheessa niiden sisällä on riittävästi happea syttymiseen ja hyvä lämmöneristys pitää lämpöhäviöt pieninä. Itsestään syttynyt huokoinen aine kytee pitkään ennen kuin se leimahtaa avoliekkeihin. Kytövaiheessa siitä lähtee kaasuja, hiilimonoksidia ja muita pyrolyysituotteita, joiden perusteella itsesytyminen voidaan havaita. Koska ne myös ovat voimakkaanhajuisia, pienikokoisten kohteiden itsesyttymisen alkaminen voidaan tunnistaa haistaen.

Varastosiilojen sisällön ja muiden pitkään varastoitavien tuotteiden lisäksi itselämpäminen sytyttää melko pieninäkin määrinä sahanpurua, erilaisia trasseleita, riepua ja muuta orgaanista jätettä erityisesti, jos niihin on sekoittunut rasvoja tai öljyjä. Mineraalivillaiset putkien lämpöeristeet, joihin vuotaa öljyä, ovat aiheuttaneet suuriakin tulipaloja. Itselämpämistä on käytetty myöskin viivästettyyn tahalliseen sytyttämiseen. Sellaista epäiltäessä on kohteesta otettava näytteitä kemialliseen analyysiin lämpiämistä kiihdyttävän aineen tunnistamiseksi. Itselämpäjä aine syttyy ainemäärän keskeltä, jolloin syttyminen on helppo tunnistaa ellei aine ole kokonaan palanut. Itsesytyvistä aineista on laaja luettelo NFPA:n käsikirjassa Fire Protection Handbook (O'Laughlin 1986, s. 5-130 - 5-133) sekä yksityiskohtaisia materiaali-kohtaisia kuvauksia Bowesin (1984) kirjassa.

Itsesyttymiseen sisältyy aina syttymisviive, joka saattaa olla huomattavan pitkä erityisesti, kun on kysymys suurista ainemääristä. Kun materiaalin ominaisuudet yhtälön (21) perusteella tunnetaan, tämä viive voidaan arvioida laskennallisesti, jos lisäksi ympäristön lämpötila tiedetään (Bowes 1984, Beaver 1995). Viiveet voivat olla niin pitkiä, että ne tulevat esiin vasta poikkeuksellisissa tilanteissa. Siten esimerkiksi hiiltä laivoilla kuljetettaessa ei lyhyillä etäisyyksillä ollut ongelmia, mutta kun sitä ruvettiin kuljettamaan esim. Australiasta Eurooppaan, kuljetusaika tuli niin pitkäksi, että itsesyttymisiä ehti tapahtua. Heinäpaalien syttymisessä parin kuukauden viiveet ovat tavallisia (Bowes 1984, s. 376).

5.9 KEMIALLISET REAKTIOT

Palamisen suppea määritelmä on aineen reagointi hapen kanssa (kohta 2.1). Kuitenkin mikä muu reaktio tahansa, joka on kohdan 2.1 yhtälön (1) muotoa ja tuottaa runsaasti energiaa, aiheuttaa hyvin palamisen kaltaisia ilmiöitä, kun nämä aineet pääsevät hyvin kosketuksiin toistensa kanssa. Reaktionopeutta kuvaa yksinkertaisimmillaan Arrheniuksen yhtälö (kohta 2.1.3) sekä hapettumisessa että monissa muissa kahden komponentin välisissä reaktioissa. Siten myös reaktionopeudet ja niiden vaihtelu yhdisteestä toiseen ovat suuruusluokaltaan samoja kuin tavataan palamisessa. Tämän vuoksi aika monia mielivaltaisen kahden kemiallisen yhdisteen A ja B välisiä reaktioita ja niihin liittyviä ilmiöitä voidaan ymmärtää soveltamalla analogisesti palamisesta tuttuja reaktio- ja ilmiömalleja.

Tässä käsiteltävät kemialliset aineet ovat sellaisia, että niitä esiintyy suuremmissa määrin vain teollisuudessa ja niiden kuljetuksissa. Lisäksi keskitytään vain paloja ja räjähdysvaaraa aiheuttaviin kemiallisiin aineisiin, jolloin rajataan pois

henkilöille tai yleensä sekä elävälle että rakennetulle ympäristölle myrkylliset ja muut haitalliset kemialliset aineet. Näiltä osin edellä esitetty analogia tulipaloilmiöiden kanssa tulee vieläkin selvemmäksi. Silti vaikka näitä aineita ei ole yleisesti saatavissa, niistä johtuvia palovaaratilanteita voi sattua eri syistä tahattomasti tai tahallisesti kaikkialla. Siksi palonsyyn tutkimuksessa on niiden aiheuttama syyttäminen otettava mahdollisuutena huomioon.

Kemialliset reaktiot vaaran aiheuttajina tunnetaan melko hyvin, ja niistä on massiiviset määrät kirjallisuutta. Kuitenkin erilaisia kemiallisia yhdisteitä on olemassa niin paljon, että kaikki niitä käyttävät eivät ole perehtyneet riittävästi niistä mahdollisesti koituihin vaaroihin. Nopeaa tiedonsaantia varten on erilaisia käsikirjoja, kortistojä, tietokoneohjelmia ja jopa suoria hakumahdollisuuksia Internetissä suurista kansainvälisistä tietokannoista. Käyttökelpoisia hakuteoksia ovat esimerkiksi Roth ja Weller (1982), Sorbe (1996) ja NFPA 491M (1991).

Vaarallisia aineita koskeva lainsäädäntö on mittavaa. Länsi-Euroopassa sovelletaan pääosin Seveso-direktiiviä (82/50/EEC), ja Suomessa on tekeillä olevaan COMAH-direktiiviin (94/C 106/04) varauduttu ennakoiden sisäasianministeriön määräyksessä 7/94 A:50 Varautuminen kemikaali-onnettomuuksiin. Palo- ja poliisi- ja muut asianomaiset viranomaiset saavat runsaasti koulutusta kemikaaleista aiheutuvien vaarojen torjuntaan. Yrityksillä on monia lakimääräisiä velvoitteita torjua niiden aiheuttamia vaaroja, tehdä vaaran arviointeja ja riskianalyysejä sen mukaan, kuinka laajaa vaarallisen kemikaalin käyttö on ja millaisia riskejä siitä voisi aiheutua.

Kemikaaleja ja niistä aiheutuvia vaaroja koskevat säädöstekstit on koottu kirjaan "Työpaikan kemikaalilainsäädäntö". Vaarallisten aineiden torjunnasta niissä esiintyvien kemiallisten ja fysikaalisten ilmiöiden pohjalta Lautkaski ja Teräsmäa (1990) ovat toimittaneet yleistajuisen oppikirjan "Vaarallisten aineiden torjunta", joka on tarkoitettu erityisesti juuri palopäällystön käyttöön.

Vaaralliset aineet luokitellaan kotimaan kuljetustarkoituksiin VAK-luokkiin, joita ovat (Lautkaski ja Teräsmaa 1990):

Luokka 1 Räjähdystarvikkeet

Luokka 2 Puristetut, nesteytetyt ja paineen alaisena liuotetut kaasut

Luokka 3 Palavat nesteet

Luokka 4

4.1 Helposti syttyvät jähmeät aineet

4.2 Helposti itsestään syttyvät aineet

4.3 Vettyessään palavia kaasuja kehittävät aineet

Luokka 5

5.1 Hapettavat aineet

5.2 Orgaaniset peroksidit

Luokka 6

6.1 Myrkylliset aineet

6.2 Tympäisevät ja infektioita aiheuttavat aineet

Luokka 7 Radioaktiiviset aineet

Luokka 8 Syövyttävät aineet

Tässä näistä ryhmistä käsitellään vain 4.3, 5 ja 8, koska muita käsitellään tämän esityksen toisissa kohdissa tai ne eivät kuulu palonsyyn selvittämisen piiriin.

Kemiallisesta energiasta palava seos voi periaatteessa syttyä useilla eri tavoilla (Kuchta 1986):

- kemiallisesta hajoamisesta
- katalyyttisistä aineista
- pyroforisista tai hypergolisista seoksista.

Luokan 4.3 aineet, kuten esim. alkalimetallit ja kalsiumkarbidi kehittävät veden kanssa heterogeenisesti pinnaltaan reagoidessaan palavia kaasuja, kuten vetyä, asetyleeniä jne. Reaktiossa voi syntyä niin paljon lämpöä, että syntyvä kaasu syttyy jo lähtökohdassaan. Reaktio voi olla hyvin kiivas ja veden äkillinen höyrystyminen voi roiskuttaa palavia kappaleita kauas syttymiskohdastaan. Reaktio jatkuu niin kauan kuin reagoivaa ainetta riittää. Tällaisia paloja ei voi eikä saa yrittää sammuttaa vedellä. Epäiltäessä tällaista syttymistä palon syyksi on

ensin otettava selvää, onko kohteessa ollut mitään kemiallista ainetta, joka olisi voinut reagoida veden kanssa. Reaktiosta jää useimmiten myös epäorgaanisia jälkiä, joita on helppoko todeta laboratoriossa alkuaineanalyysillä, kun tavanomainen näyte epäilystä kohdasta on sinne toimitettu.

Katalyyttisinä materiaaleina, jotka aiheuttavat syttymisen, kirjallisuudessa on mainittu (Roth ja Weller 1982) raskasmetallisuolat, harvinaisten maametallien yhdisteet, hienojakoinen platina. Heterogeenisten katalyyttien teoriasta on perusteita esitetty Atkinsin (1982, s. 1003 - 1040.) ja Berry ym:n (1980, s. 1249 - 1253) kirjoissa.

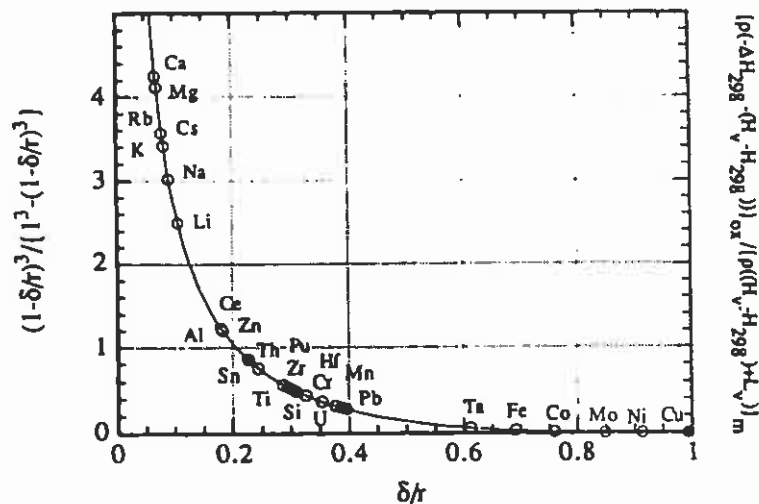
Ryhmän 5.1 aineiden molekyyliissä on helposti vapautuvia, muihin aineisiin sitoutuvia happiatomeja. Reagoidessaan ne sytyttävät tulipalon, joka voi edetä vaikka ulkopuolista happea ei olisi käytettävissä. Reaktionopeus noudattaa Arrheniuksen yhtälöä, joten lämpötilannousu kiihdyttää näitä reaktioita. Esimerkkejä ryhmän 5.1 aineista ovat vetyperoksidi, natriumkloroatti ja ammoniumnitraatti. Vetyperoksidin ominaisuuksia käsittelee seikkaperäisesti Schumbin ym. (1955) kirja.

Ryhmän 5.2 orgaaniset peroksidit poikkeavat ryhmän 5.1 hapettavista aineista siten, että niissä on molekyyliissä vieläkin enemmän happiatomeja. Siten ne voivat ylläpitää voimakasta palamista ilman ulkoista happilähdettä, joten palaminen voi olla suorastaan räjähdysnomaista. Tässä suhteessa nämä yhdisteet lähenevät varsinaisia räjähdysaineita (ryhmä 1). Lämpötilan nousu ja vieraat aineet kiihdyttävät reaktion nopeutta edelleen. Ne voivat syttyä myös iskusta ja hankauksesta, joten niiden kuljetukselle ja käsittelylle on tiukat ohjeet. Peroksiyhdisteiden kemiasta ja niiden turvallisuusvaatimuksista Castrantas ym. (1965) ovat tehneet tiiviin katsauksen. Peroksiyhdisteitä ei ole helposti saatavissa, joten ne aiheuttavat paloja pääasiassa teollisuudessa ja niiden kuljetuksissa. Palonsyyn selvitys on aloitettava laatimalla luettelo käytössä olleista kemikaaleista, katsottava sisältävätkö ne orgaanisia peroksideja ja tarkistettava lähdeeteoksista, voivatko ne hajota aiheuttaen tulipalon syttymisen.

Hypergolisella seoksella tarkoitetaan kemiallisten aineiden seosta, jossa voimakas hapetin ja voimakkaasti pelkistyvä aine kohtaavat ja reaktio syttyy ilman ulkoista energialähdettä (English 1970). Hypergolisia reaktioita voivat aiheuttaa väkevät hapot, etikkahappoanhydridi, helposti hapettuvat orgaaniset aineet ja muut palavat aineet sekä väkevä vetyperoksidi. Vetyperoksidin tai typpihapon kanssa muodostuvien hypergolisten seosten varhaisia tutkimusvaiheita pääasiassa sotilastarkoituksiin maailmansotien välisenä aikana selostaa Schumb ym. (1955, s. 601 - 602) kirjassaan. Hypergolisessa seoksessa hapettavan aineen reaktioilla polttoaineen pinnalla on ratkaiseva merkitys (Benard ym. 1974). Hypergolisen syttymisen teoria on kuvattu yksinkertaisesti Vilyunovin ja Zarkon (1989) kirjassa jähmeälle aineelle. Hypergolisten reaktioiden kinetiikan yksityiskohtia erilaisissa seoksissa ei tunneta vielä kovin yksityiskohtaisesti (Kulkarni ja Panda 1980). Hypergolisten aineiden sytyttämiä paloja voi esiintyä teollisuudessa ja laboratorioissa, mutta Suomessa näitä aineita ei ole helposti saatavissa yleisön käyttöön. Palon tutkinta aloitetaan näidenkin tapauksessa laatimalla luettelo

käytössä olleista kemikaaleista ja käyttämällä jatkokäsittelyssä erikois-
asiantuntijoita.

Kemiallisen aineen ja ilman kosketuksesta itsestään käynnistyviä reaktiota kutsutaan pyroforiseksi (vrt. kohta 5.8). Glassman ym. (1992) ehdottavat pyroforisuuden määritelmäksi metallihiukkasille: metallijauhe on pyroforista, jos se syntymätilassa (ilman oksidikerrosta) on niin hienojakoista, että joutuessaan kosketuksiin normaalitilassa olevan ilman kanssa ja hapettuessaan se muodostaa niin paljon lämpöä, että loputkin hiukkasen metallista höyrystyy. Pyroforisuudesta kirjallisuudessa on erilaisia määritelmiä, jotka eivät ole johdonmukaisia ja joita sekoitetaan muihin prosesseihin. Tätä metallijauheen määritelmää voidaan käyttää soveltaen muihinkin hapettuviin, kemiallisiin yhdisteisiin. Pyroforinen aine reagoi hyvin nopeasti joutuessaan kosketuksiin ilman kanssa. Kuvassa 5.14 on esitetty eri metalleille pyroforisuuden riippuvuus hiukkaskoosta. Hiukkasen säde on r ja muodostuvan oksidikerroksen paksuus δ . Vaaka-akselina on suhde δ/r ja pystyakselilla vain metallin ja sen oksidin termodynaamisista ominaisuuksista riippuva funktio, jonka perusteella on piirretty eri metallien paikat tälle käyrälle, pyroforiset avoimilla ja ei pyroforiset suljetuilla ympyröillä. Pyroforiset metallit asettuvat alueelle $\delta/r < 0,4$, mutta raja ei ole terävä. Tämän yläpuolelle asettuvat metallit eivät noudata tätä mallia. Koska oksidikerrosten paksuus useimmilla metalleilla on luokkaa 2 ... 5 nm, myös pyroforisten hiukkasten koko on hyvin pieni 10 ... 50 nm.



Kuva 5.14. Metallin pyroforisuuden riippuvuus hiukkaskoosta (Glassman ym. 1992).

Useat metallit kuten boori, sirkoni, pii, titaani, uraani ja kupari, jotka eivät tämän kriteerin mukaan voi muodostaa pyroforisia hiukkasia, reagoivat ilman kanssa. Tämä on kuitenkin paljon hitaampaa, tavallista heterogeenista pinnan hapettumista, josta ei seuraa metallin höyrystyminen reaktiopinnalta. Pintaan saattaa muodostua myös jähmeää oksidia, mutta se on rakenteeltaan niin huokoista, ettei se suojaa alla olevaa metallia (esim. rauta), joten hapettava heterogeeninen reaktio jatkuu. Tämän reaktion nopeus on kuitenkin hidasku.

verrattuna pyroforiseen prosessiin ja siten se on vaarallisuudeltaan paljon näitä lievempi.

Palonsyytä selvittäessä erityisten kemiallisten aineiden osuutta epäiltäessä on hankittava tietoja kohteen käyttäjältä, mitä aineita on ollut käytössä. Mikäli mukana on ollut epäorgaanisia aineita kuten metalleja, ne eivät tyystin häviä palossa eikä edes räjähdyksessä. Siten ottamalla näytteitä tapahtumapaikalta laboratorioon tutkittaviksi voidaan yleensä osoittaa, ovatko ne voineet aiheuttaa syttymisen. Tässäkin suurimpana vaikeutena on erilaisten aineiden moninaisuus. Ei ole helppoa tietää kaikkia mahdollisia reaktioita eikä heti lähteä epäilemään näin teknistä tapahtumien kulkua. Teollisuuslaitosten paloa selvittäessä käyttökäyttökunnalla on yleensä runsaastikin tietoa erikoisaineiden ominaisuuksista ja heitä onkin käytettävä apuna. Ellei tämä ole mahdollista, on käytettävä muita, mahdollisesti puolueettomia, alalta löytyviä asiantuntijoita.

“Pyroforista hiiltä”, johon kirjallisuudessa viitataan silloin tällöin ymmärtäen sillä esimerkiksi kytevän palon kuten kuumenneen lämpöputken ympärille eristeestä hiiltynyttä ainetta, ei useissa laboratoriokokeissa ole onnistuttu saamaan aikaan. Lämmitettäessä puutuotteita ennen itsesyttymiskokeita itsesyttymislämpötila muuttuu hieman, mutta se on selitettävissä helposti höyrystyvien aiheiden poistumisella näytteestä. Kun orgaanista materiaalia lämmitetään pitkiä aikoja ilmassa, se menettää huomattavasti painoaan ja lopulta muuttuu lähes pelkäksi hiileksi, mutta näin jatkuvasti ilman kanssa kosketuksissa ollut hiili on ominaisuuksiltaan aivan erilaista kuin hapettomassa tilassa kuivatislattaessa saatava aktiivihiihi. “Pyrolyyttinen hiili” lieneekin syntynyt väärinkäsityksenä ajateltaessa sen olevan samanlaista kuin kemiallisesti aktiivinen, pinnaltaan erittäin suuri (100 ha/kg!) aktiivihiihi (Bowes 1984, s. 351 - 353).

Suomen tuhoisin kemikaalionnettomuus on ollut Typpi Oy:n 40 m korkean, 8-kerroksisen salpietariosaston räjähdys Oulussa 9.1. 1963, missä 10 henkeä sai surmansa ja toistakymmentä henkilöä loukkaantui (Ollila 1963). Salpietari-laitoksen sekoitussäiliössä räjähti 10 tonnia sulaa ammoniumnitraattia 150 ... 160 °C:n lämpötilassa, joka tuhosi laitoksen rakennuksen ja sen vieressä olevan rakeistustornin sekä vaurioitti useita muita rakennuksia ja rikkoi ikkunoita 3 kilometrin säteellä aiheuttaen yhteensä 11 Mmk:n vahingot silloista rahaa. Onnettomuuden ilmeisenä syynä oli ammoniumnitraatin ylikuumeneminen sekoituskattilassa, jonka lämmityshöyry (240 °C) on paikallisesti ylikuumentanut niin, että ammoniumnitraatti on alkanut hajota. Tätä on edistänyt sulatteeseen joutunut orgaaninen aine. Hajoaminen on lämmittänyt sulatetta paikallisesti niin paljon, että koko sekoituskattilan sisältö räjähti. Hajoamisreaktio yli 260 °C:n lämpötilassa on



Karkeasti räjähdyksessä vapautunut energiamäärä olisi siten ollut 9 ... 15 GJ reaktion täydellisyysasteesta riippuen.

5.10 TUULI, SADE, TULVAVESI

Tuuli

Voimakas tuuli voi rikkoa rakennuksia tai niiden osia ja aiheuttaa sähköjohtojen eristeiden vaurioitumista ja oikosulkuja. Rikkoontuneet kaasuputket voivat johtaa vuotoihin ja kaasupaloihin. Ilmassa kulkevien sähköjohtojen joutuminen kosketuksiin toistensa tai muiden esineiden kanssa tuulen vaikutuksesta edellyttää yleensä johtoja kannattavien rakenteiden sortumista.

Sade

Rakennukseen ja/tai sähköisiin laitteisiin vuotava sadevesi voi aiheuttaa oikosulkuja ja sytyttää tulipaloja. Tuulen puskema vesi voi aiheuttaa samanlaisia ongelmia. Sadevesi voi tunkeutua veden kanssa reagoivia kemikaaleja sisältäviin astioihin, johtaa eksotermisiin eli lämpöä vapauttaviin reaktioihin, jotka voivat johtaa tulipaloihin.

Tulvavesi

Tulviva vesi ylivuotavista viemäreistä voi aiheuttaa tulipaloja sähkölaitteiden ja -johtojen oikosulkujen kautta. Vesi voi tulvia luonnollisista syistä kuten voimakkaiden vesisateiden vuoksi tai jokien tulvimisesta. Viemärit voivat tukkeutua muistakin syistä, esim. niihin joutuneista sopimattomista esineistä tai vuotavien putkien tapauksissa maa-aineksesta. Kun tulvavesi laskee, siitä jääneet jäljet saattavat sekoittaa sammutusveden jättämiin jälkiin. Tarkistamalla naapurirakennuksien tilanne mahdollinen tulva voi selvitä. Rakennuksen alempien osien sähköjärjestelmästä tarkistetaan mahdollisia oikosulkuun viittaavia jälkiä.

Rikkoutuneet vesijohtoputket, WC-huuhtelusäiliöt ja vastaavat vesilähteet rakennuksessa voivat myös aiheuttaa vaaratilanteita oikosulkemalla sähkölaitteita tai sammuttamalla kaasulaitteiden liekkiä. Jos kaasua vuotaa liekin sammuttua, räjähdyksen ja/tai tulipalon vaara on ilmeinen.

5.11 ELÄIMET

Lemmikkieläimet voivat kaataa kynttilöitä, valaisimia, lämmittimiä tai muita kuumia laitteita syttyvän materiaalin päälle tai läheisyyteen ja siten aiheuttaa tulipalon. Eläimet voivat myös raahata tyynyjä, huopia ym. palavaa tavaraa palovaarallisiin paikkoihin.

Eläimet, varsinkin jyrsijät kuten hiiret, myyrät ja rotat, ovat aiheuttaneet tulipaloja nakertamalla sähköjohtojen eristyksiä. Tästä on seurannut oikosulku joko heti tai myöhemmin, kun paljaiksi jääneet johtimet koskettavat toisiinsa. Jyrsimisjäljet ovat usein tuhoutuneet eristeiden mukana oikosulkukohdassa, mutta jyrsimisjälkiä kannattaa etsiä mahdollisesta palamatta jääneestä eristeestä.

Linnut ja nisäkkäät voivat koskettaa virrallisia voimajohtoja, johtoja muuntaimoissa ja vastaavissa paikoissa, oikosulkea niitä vaikka yrittämällä rakentaa

pesää jännitteisten laitteiden varaan, mistä seuraa tulipalo. Ne voivat mahdollisesti itse syttyä tuleen ja levittää paloa paikasta toiseen.

5.12 MUUT

5.12.1 Auringonvalo

Auringonvalo voi tietyissä olosuhteissa sytyttää tulipalon. Linssin muotoiset lasinpalat tai koverot heijastavat pinnat, jotka pystyvät kokoamaan auringonsäteitä polttopisteeseen voivat sytyttää selluloosapohjaisia polttoaineita. Tällaisen syttymisen edellytys on, että

- linssi tai peili pystyy keskittämään auringonsäteitä polttopisteeseen
- syttyvää materiaalia on polttopisteessä
- aurinko on ollut syttymishetkellä sellaisessa asemassa, että sen säde on voinut kulkea esineen kautta mahdolliseen syttyneseen aineeseen.

Auringonvaloa sytyttäjänä voidaan katsoa ainakin kahdesta näkökulmasta:

Auringon syyksi syttymistä voi väittää henkilö, joka haluaa kääntää huomion muista hänen kannalta raskauttavimmista syistä. Pöydälle jääneen lasin tms. esineen aiheuttamaa vaaraa tuskin voidaan edellyttää varottavan, kun auringon asemakin muuttuu jatkavasti. Tällöin tutkijan on otettava selville, mikä oli epäilty sytyttävä esine, missä se oli väitettyyn syttymisaikaan, milloin syttyminen tapahtui ja mitä palavaa oli mahdollisessa syttymiskohdassa. Ellei esine ole ollut uniikkikappale, joka on tuhoutunut palossa, samanlaisen hankkiminen kokeiltavaksi joko kohteen säilyneestä astiastosta tai sarjatuotteen toimittajalta ei liene ylivoimaista.

Aurinkoa voidaan käyttää myös aikasytyttimenä, mutta se edellyttää tarkkaa suunnittelua. Tätä epäiltäessä otetaan selville samat tiedot ja hankitaan samoin vertailuesine kuin edellisessä kohdassa.

Esineen linssivaikutus on helppo todeta kääntelemällä sitä eri asentoihin pimeässä huoneessa vaaleaa seinää varjostimena käyttäen, kun naapurihuoneessa palaa pienikokoinen hehkulamppu. Mahdollisen polttopisteen etäisyys esineestä ja esineen asento säteeseen nähden merkitään muistiin. Asetetaan esine epäiltyyn syttymiskohtaan väitettyyn asentoon ja mitataan polttopisteen paikka mahdollisesta auringonsäteiden tulosuunnasta.

Jos tähän saakka tulokset ovat olleet mahdollisia, esineellä tehdään sytyttämiskoe auringonvalossa käyttäen väitettyä syttynyttä materiaalia polttopisteessä. Esimerkkinä syttymiseen tarvittavasta energiatiheydestä on puu, joka syttyy, kun siihen osuva lämpövirrantiheys on noin 28 kW/m^2 (Drysdale 1985). Varsinaisen

linssin polttopisteessä tällainen lämpövirta saavutetaan helposti. Satunnaiset linssit, kuten erilaiset lasiesineet tuskin muodostavat niin teräviä polttopisteitä, että syttyminen olisi ilman muuta mahdollista.

Jos esine kykenee sytyttämään materiaalin, viimeinen ratkaiseva koe on tarkistaa päivän säätila Ilmatieteen laitokselta, ja jos aurinko on näkynyt, määrittää sen tarkka asema syttymishetkellä. Auringon korkeuskulman ja pituuspiirin voi laskea yksinkertaisella kaavalla tai määrittää nomogrammista (Nyströmin (1962 s. 110 - 111) piirtämän nomogrammin lukeminen on myös taidenautinto). Tarvittaessa voi pyytää apua lähimmältä tähtitieteen laitokselta tai imuroida verkosta korkeuskulman määrittävän tietokoneohjelman.

Koska näin monen eri tekijän täytyy täsmätä samanaikaisesti, aurinko on helppo sulkea pois täysin varmalla tavalla satunnaisena tahattomana sytyttäjänä. Jos sitä on käytetty tahalliseen aikasytytykseen, samoin menettelyin sitovan näytön hankkiminen on helppoa. Tällaiset tapaukset ovatkin hyvin harvinaisia (McGuire 1970). Sitä vastoin lasten polttolasileikeissä, Suomessa varsinkin keväisten kuivien, kulottuneiden ruohikoiden sytyttäjänä suora aurinkoenergia lienee silloin tällöin käytössä.

6. PALON KEHITTYMINEN

Tässä jaksossa selostetaan palon kehittymisen kulkua rakennuksen tasolla keskittyen koko palopaikan tapahtumiin. Tiettyjä näkökohtia on jo käsitelty syttymiskohdan tutkimisen yhteydessä luvussa 4. Tämän kohdan tavoitteena on luoda kokonaiskuva tapahtumista ja pohjustaa yhteenvedon tekemistä, kun syttymiskohta on tunnistettu ja kun syttymissyystä on joitakin malleja tai oletuksia. Vaikka palo on useimmiten ihmisen välittömän tai välillisen toiminnan seurausta, syttyyään tulipalo on luonnontieteellinen ilmiö ja sen kulku noudattaa luonnonilmiöiden lakeja, jotka tunnetaan jo kohtuullisen tarkasti. Sen tarjoamia mahdollisuuksia muodostaa kokonaisvaltainen käsitys palon kulusta selostetaan tässä luvussa. Tämä ei tarkoita, että ihminen suljettaisiin pois tästä prosessista, vaan sitä, että luonnontieteellisellä näkemyksellä täytetään niitä kohtia, jotka henkilöhavaintojen perusteella jäisivät valkoisiksi.

Ensimmäisessä osassa käsitellään yleisellä tasolla palon kulun eri vaiheiden ajoittamisen käytännöllisiä näkökohtia, toisessa osassa rakennuspalon kehittymisen vaiheita ja eri osaprosesseja sekä kolmannessa osassa palon rekonstruktioita numeerisella simuloinnilla ja laboratoriokokeilla. Koko jakso käsittelee rakennusten tulipaloja ja jättää kokonaan tarkastelun ulkopuolelle avoimen tilan palot, kuten metsäpalot, joihin erityisesti toisen ja kolmannen jakson menetelmät eivät sovellu.

6.1 PALOTAPAHTUMIEN AJOITTAMINEN

Jokainen tulipalo on erilainen, mutta sen kehittymiselle on yhteistä palon eteneminen eri vaiheissa tietyllä, kohteen monesta ominaisuudesta riippuvalla nopeudella. Palon kulun ymmärtämiseksi aikahavainnot ovat ensiarvoisen tärkeitä, sillä niitä voidaan tehdä helposti hyvin tarkasti. Useimpien muiden palopaikan ilmiöiden kvantitatiivinen mittaaminen onkin jo huomattavasti vaikeampaa. Kun tunnetaan riittävän tarkasti palon etenemisen päävaiheet, palon kulun ymmärtäminen on huomattavasti helpompaa kuin esimerkiksi vain palojälkien perusteella muodostetusta kuvasta.

Tulipaloista, jotka tulevat julkisen palokunnan tietoon, tulee hälytykset, jotka rekisteröidään noin minuutin tarkkuudella. Palokunta ilmoittaa lähdöstä, palopaikalle saapumisesta ja sieltä lähdöstä tiedot, jotka tallennetaan heti ja kirjataan myöhemmin aluehälytyskeskuksen hälytysselesteeseen. Nämä muodostavat ajalliset puitteet, joiden perusteella useimmat palotapahtumat voidaan kiinnittää maan viralliseen aikaan noin minuutin tarkkuudella.

Palotapahtumat on hyvä kiinnittää tähän kehykseen muodostamalla niistä lineaarinen aikajana. Tällaisen malli on ehdotettu kuvassa 6.1. Aikajana ei ole rikosten tutkinnassa mikään uusi käsite. Weston ja Wells (1994 s. 244 - 245) suosittelivat sitä ensi kertaa 1970 ilmestyneessä kirjassaan, mutta viittaavat siellä paljon vanhempaan, Grazin professori Grossiin. Noin sata vuotta sitten hän esitti uranuurtavassa kirjassaan *Handbuch für Untersuchungsrichter*: "Erittäin merkittäviä monissa tutkimuksissa ovat niinkutsutut yleiskatsaustaulut, jossa

tutkimuksen tulokset on esitetty siten graafisesti, että tärkeimpien tapahtumien kulku voidaan nähdä yhdellä silmäyksellä. Tässä on ennenkaikkea tärkeää, että tutkimuksista etsitään tärkeä ja tuloksiin vaikuttava ja vain tämä esitetään graafisesti, sillä esitettäessä samalla tavalla sivuasioitakin ei ainoastaan tuhlaudu aikaa ja vaivaa, vaan se vaikuttaa myös hämäävästi lukijaan, joka antaa niille liikaa painoa.” (Gross ja Seelig 1942 s. 64.)

Taulukkolaskennan tulo kaikkien ulottuville siihen liittyvine graafisine apuvälineineen on tehnyt aikajanadiagrammeista yksinkertaisen ja houkuttelevan mahdollisuuden aivan rutiinitapauksissakin.

A	B	C
		Hahlaisten kievaripalo 29.02. 1993
Kellonaika		Turkka Tulkija 12.3.1993
0.22		Viimeinen henkilö poistui krouvista. [A11]
		Lähdelaetelo
0.25	A1	Täyskylän AHK:n nauha
	A2	Tenkän AHK:n nauha
	A3	Hälytysseoste, Hahlainen 24 921 0 01521
	A4	B. Birken kuuleminen 7.3.1993
	A5	Ilmoitusnumero 8384/80031/93, s. 3
0.30	A6	K. Tapanisen kuulustelupöytäkirja 5.3.1993
	A9	S. Laksin kuulustelupöytäkirja 29.2.1993
	A11	T. Juhaniilan kuulustelupöytäkirja 2.3.1993
	A12	J. Torkkelin kuulustelupöytäkirja 29.2.1993
	A13	C. Birken kuulustelupöytäkirja 29.2.1993
0.35	A15	R. Nivailan kuulustelupöytäkirja 29.2.1993
		M1. Rekankuljettaja ei havainnut paloa ohiajessaan (Erjälä puhelimesta 12.3.93)
0.40		P2. Jos palo olisi syttynyt krouvissa juuri tämän havaisijan näkemisen jälkeen, krouvi olisi voinut lieksahtaa tämän katkoviivanveto asoittamassa kohdassa. Yhtenäinen viiva kärjessä korvaa ikkunoiden rikkoutumiseen tarvittavaa aikaa lieksahduksen jälkeen. Nuoli R palon alkamista, kun kiintopisteeksi valitaan Birken havainto hälytyshetkellä.
0.45		P3. Jos palo olisi syttynyt hallissa, nuoli H korvaa sen alkuhetkeä, kun sen on asetettu Stefanonin havainnon ajankohtaan. Tila lies katkoviivan nuolenkärjen kohdalla ja ikkunat ovat rikkoutuneet yhtenäisen viivan kärjen kohdalla.
0.50		V1. Paloilmoitus Täyskylän aluehälytyskeskukseen (00:47, G. Stefanon), [A1]
		M2. Kievari ilmillekeissä [A1]. Tuli ei mielestäni ollut levinnyt krouviin.
		M3. Katto oli mielestäni palanut jo puhki. Kylissä paloi tuolloin vielä valot. ... [A6].
0.55		V2. Tenkän AHK (D. Vahtera) hälyttänyt Ha11 ja Ha12 (0:51) [A2]
1.00		M4. Turjaila: Kievarin krouvi tulossa, tulta kaikista reitistä, sarjatuulen paukahtelua, ja palo kiihtyi, katon alta savua, [A8, A4]
		V3. Paloilmoitus Täyskylän aluehälytyskeskukseen (00:56, B. Birke), [A1], [A12], [A13]
		M5. Aivan ilmillekeissä, palokunta ei näy, ihmiset juoksee tuolla pitkin kievarin pihaa, [A1]
		V3a. B. Birke: Täyden palamisen vaiheessa rakennuksen toinen pääty [A2]
		M6. Knuuttila: Mainoskyltti räjähti juuri silloin kun menimme pihaan [A12, A2]
		M7. B. Birke: Menin krouvin edessä olevien portaiden alapäähän ja jäi hetkeksi siihen, koska kuumuus esti lähemmäs menemisen [A]
		P1. Sähköt palokki valko vika laitteissa? (T. Juhaniila), [A11]
		M8 (T. Juhaniila) Lamppu ei syttynyt. Videoiden kello ei näyttänyt aikaa, [A11].
1.05		V4. Ha12 erittäin nopeana palomaton pihaan, valokuva (1:06, Lottonen+4), [A3]
		M9. Lottonen: Tämä on ihan valmiissa kunnossa. Kievaritila on jo puolessa vaiheessa menossa, [A2]. (Lakso) Kievarin krouvi ja eteinen täysin liekkien vallassa. Krouvin rakenteet olivat ryhdissänsä tullessamme paikalle. [A9].
		M10. V. Niitty soittaa poliisille, [A5]
1:10		M11. Kievarin kyltti alkoi palaa, [A11].
		V5. Ha11 ja Ha191 kohteessa (1:11, paloesimies Nivaila+5), [A3, A15]
1:15		M12. Krouvin katto oli romahtanut alas ja kattotiilet olivat tippuneet alas, [A11]

Kuva 6.1. Palotapahtuman aikajanaesitys taulukkolaskentalomakkeella.

Tässä mallina esitetyn aikajanakaavion (kuva 6.1) otsikkona on palon nimi ja tapahtuma-aika sillä tarkkuudella, että se on tunnistettavissa yksikäsitteisesti. Seuraavalla rivillä on kaavion laatijan nimi ja laadinnan päiväys.

- Sarakkeessa A on kellonaika tunteina ja minuutteina lineaarisesti esitettynä siten, että kukin rivi vastaa yhden minuutin aikaa (nopeissa tapahtumissa jako voi olla tiheämpi).
- Sarake B varataan ajoituksen tarkkuutta merkitseville janoille ja nuolille.
- Sarakkeen C alku sisältää väitteiden luokittelun: (V) varma, ajoitettaviin dokumentteihin perustuva, (P) tutkijan päättelemä erilaisilla menetelmillä, (M) muu todistajan väite, jonka ajoituksesta tutkija saattaa esittää arvion. Kaikki väitteet numeroidaan kuviossa esitetyllä tavalla siinä järjestyksessä kun ne sijoitetaan aikajanelle.
- Sarakkeessa C seuraavana on väitteen sisältö. Todistajien lausunnoista otetaan sanat pikkutarkasti siinä muodossa, missä ne on viety asiakirjoihin jopa kirjoitus- ym. virheineen ja poisjätettyjen sanojen tilalle merkitään kolme pistettä.
- Sarakkeessa C väitteen lopussa on viitteet niihin asiakirjoihin, joista väitteet ovat peräisin. Viite on pakollinen kaikkien muiden väitteiden kohdalla paitsi P-tyyppisten tutkijan päättelyjen, jotka hänen täytyy perustella erikseen tutkimusraporttinsa sanallisessa osassa.

Raporttia jatketaan niin pitkälle kuin se on palon syyn selvittämiseksi tarpeellista. Usein se voidaan katkaista jo paljon ennen palokunnan poistumista, esimerkiksi silloin, kun palo on saatu sammuttajien hallintaan.

Aikajanaesityksen laadinta aloitetaan sijoittamalla sille varmat (V) väitteet, jotka saadaan ahk:n raportista suoraan kellonaikoina, ahk:n äänitetystä nauhasta keskusteluista operatiivisen henkilöstön kanssa, kun nauhan tapahtumat on erikseen jälkikäteen ajoitettu, sekä muista mahdollisesti vastaavalla tarkkuudella ajoitettavilta ja kirjatuilta tietovälineiltä, joita voivat olla videonauhoitukset, äänitteet, piirturipaperi, tietojenkeruulaitteet ja jotkin muutkin luotettavasti tapahtumia eri tavoin rekisteröivät ja jälkikäteen ajoitettavissa olevat välineet. Näiden on oltava peräisin puolueettomista lähteistä ja todistettavasti alkuperäisessä muodossa, mikä niiden käyttäjän on asianomaisella tavalla varmistettava.

Todistajien lausumat ja heidän antamansa muut tiedot, vaikka ne perustuisivat samanaikaiseen muistiinmerkintään, esitetään väitteinä (M). Niiden ajoituksen varmuuden tutkija esittää nuolella sarakkeessa B, missä nuolen pituus kattaa väitteen arvioidun tapahtumavälin. Lausumat otetaan kuulustelupöytäkirjoista tai muusta kirjallisesta aineistosta, ja asiakirjan lähdeviittaus merkitään näkyviin. Lähdeasiakirjaan lainauskohta merkitään väitteen nimellä (esim. M3) ja lainatut sanat yliviivataan korostuskynällä, jotta jälkikäteen asiaa tarkistettaessa voitaisiin todeta, että olennaiset asiat on otettu huomioon. Lainaus esitetään niin suppeana kuin mahdollista ja keskittyen vain avainsanoihin palon syyn ja mahdollisen paloon liittyvän muun merkittävän seikan selvittämisen kannalta.

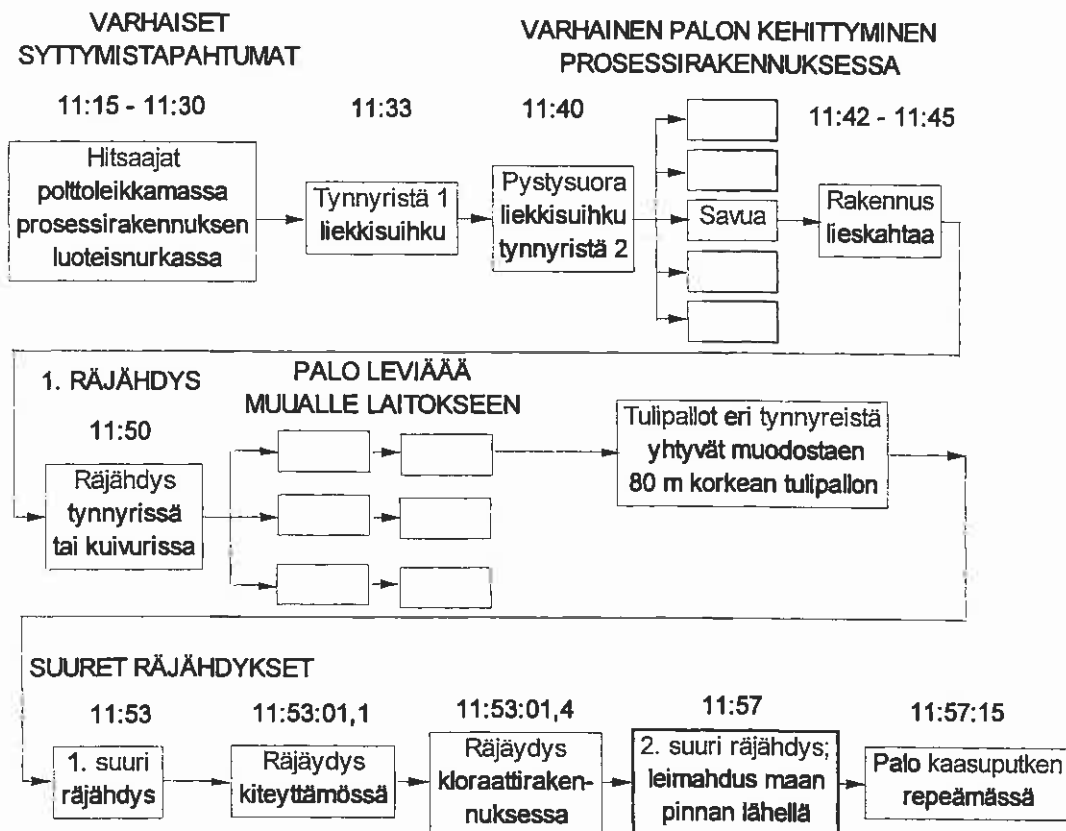
Kun saatavilla oleva todistusaineisto on sijoitettu aikajanalle, tutkija alkaa muodostaa siitä kuvaa hahmottamalla kokonaisuutta. Tässä vaiheessa hän saattaa havaita joitakin seikkoja, joita olisi kysyttävä todistajilta. Nämä havainnot kirjataan ja esitetään kuulustelijalle. Kun vastaukset saadaan, niistä mahdollisesti löydettävä lisätieto sijoitetaan samalla tavalla aikajanalle.

Näiden kanssa rinnakkaisesti tutkija merkitsee palopaikalta tekemiensä havaintojen väitteet ja muuten tutkimuksillaan saamansa tulokset tunnuksella (P) kaavioon sekä sijoittaa ne siinä olevan ajoitetun tapahtumasarjan antamien vihjeiden perusteella todennäköiseen paikkaan ja merkitsee nuolella sarakkeeseen B aika-arvionsa suurimman mahdollisen virhejanan. Merkittävimmät päätelmät esitetään kehystettynä omassa tekstiruudussaan (P1 ja P2 kuvassa 6.1). Kun päätelmistä muodostettava kuva alkaa olla valmis, tutkija pyrkii hahmottamaan koko tapauksen kulun ja jakamaan sen tärkeisiin erillisetappeihin, jotka on voitava päätellä kaikin tämän kirjan eri osissa kerrotuin keinoin. Aikajanaesitys toimii sitten tutkinnan myöhemmässä vaiheessa ja mahdollisessa oikeuskäsittelyssä palotapauksen sisällysluettelona, jolla eri tekijöiden riippuvuus on helppo jäsentää. Kaavion havainnollisuutta voidaan vielä lisätä käyttämällä erilaisia värejä luonnehtimaan erilaisia tapahtumien kulun vaihtoehtoja. Laajojen tutkimusaineistojen käsittelyssä tämä aikajanakaavio siihen systemaattisesti liittyvän, samoilla symboleilla merkityn asiakirjakansion kanssa muodostaa välineistön, jolla palotapauksen tutkintaa on helpompi jäsentää. Laajoissa tutkimuksissa piirretään myös tilan vaatiessa useita rinnakkaisia janoja, joiden aika-asteikko on yhteinen, mutta jotka ryhmitellään jonkin loogisen menetelmän mukaisesti. Kun janakaaviot sijoitetaan rinnakkain, huomattavan laajankin tapahtumakokonaisuuden kulku voidaan käsittää yhdellä silmäyksellä.

Intimiteettisuojaan niin vaatiessa (toisin kuten kuvan 6.1 esimerkissä on tehty) kukin asiakirja numeroidaan juoksevasti A1, A2 jne ja kukin niissä oleva henkilö esitetään koodinimellä H1, H2 jne. Asiakirjojen viiteluettelo ja henkilökoodien avain laaditaan erilliselle lomakkeelle, ja se annetaan vain siihen oikeutetun, suppean piirin käyttöön. Kuvan 6.1 mallissa viiteluettelo on tilan säästämiseksi sijoitettu kaavion tapahtumaköyhälle osalle.

Kun palon kehittyminen etenee monimutkaisemmin kuin tavallisessa yksinkertaisessa rakennuksen palossa, tapahtumapuuesitys on hyvä palon havainnollistaja. Harvinainen esimerkki, missä tapahtumat ovat kirjautuneet luotettavasti suurina kokonaisuuksina on Yhdysvalloissa Nevadan Hendersonissa 4.5. 1988 sattunut Pepconin ammoniumperkloraatitehtaan palo/räjähdyks (Mniszewski 1994). Ammoniumperkloraatia käytetään pääasiassa rakettien jähmeänä polttoaineena sekä sotilas- että avaruustutkimuskäytössä. Runsaasti energiaa sisältävänä aineena se on TNT:n luokkaa, siitä syystä myös palon seuraukset olivat vakavat. Kahdessa suuressa räjähdyksessä räjähti muutama sata tonnia perkloraatia, jolloin kaksi henkilöä menehtyi ja 372 henkilöä loukkaantui. Tapahtumien kulusta saatiin videonauha läheisen kukkulan laelta, josta televisiotornin huoltoryhmä kuvasi sen aivan alkutapahtumien sattumisen jälkeen.

Tapahtumien kulku oli niin nopeaa, että muunlainen tallennus ei olisi kyennyt ajallisesti rekisteröimään niitä. Tehtaan alue oli yli 3 ha. Sijoittamalla videokuva alueen CAD-piirroksista tehdyn, samasta perspektiivistä katsotun kuvan päälle voitiin eri tapahtumat sijoittaa oikeisiin rakennuksiin, ja käyttämällä tukena todistajien antamia ja laitteiden rekisteröimiä tietoja voitiin laatia johdonmukainen aikajanaesitys noin 45 min ajalle, jolloin palon dramaattiset tapahtumat sattuivat. Kuvassa 6.2 on tästä piirretty tapahtumapuu, joka on hyvä malli monimutkaisen palon eri tapahtumien keskinäisen yhteyden selvittämiseksi.



Kuva 6.2 Tapahtumapuu (yksinkertaistettuna) Pepconin palon/räjähdyksen kulusta (Mniszewski 1994).

Palotapahtumat palonsyyn tutkimuksessa on voitava esittää erittäin kansantajuisella tavalla, koska niistä joudutaan keskustelemaan henkilöiden kanssa, jotka eivät ole tulipalon eikä muunkaan tekniikan asiantuntijoita. Käyttökelpoisia keinoja, joihin tässä ei mennä syvemmin, palotapahtumien havainnollistamiseksi ovat (kasvavan valmistelutyömäärän mukaisessa järjestyksessä):

- valokuvat
- kaaviot ilmiöiden esittämiseksi
- dia- tai kalvosarjat
- animaatiot mikrotietokoneen kuvaruudulle
- multimediaesitykset.

6.2 PALON KEHITTYMINEN RAKENNUKSESSA

Kun todisteiden perusteella palosta on luotu kokonaiskäsitys kuvien 6.1 ja 6.2 osoittamalla tavalla, palon kehittyminen eri havaintopisteiden välisenä aikana on esitettävä johdonmukaisena, luonnontieteellisten tosiseikkojen mukaisena kulkuna. Siten on oletetusta syttymiskohdasta päästävä rakennuksessa käytettävissä olevan palokuorman palaessa sellaisiin tilanteisiin, jotka on luotettavasti rekisteröity jostain myöhemmästä havainnosta. Tähän päästään käyttämällä palon leviämismalleja. Rajoitumme tässä käsittelemään jähmeitä ja nestemäisiä palokuormia, sillä kaasun hallitsematon palaminen johtaa lähes aina räjähdykseen, joita käsitellään luvussa 9.

Liekehtivä palo etenee nestemäisestä ja jähmeästä aineesta muodostuvassa palokuormassa kahdessa vaiheessa: (1) liekit leviävät pitkin aineen pintaa ja (2) palaessa ainetta kuluu siten, että sitä häviää syvyys suunnassa kohtisuoraan sen alkuperäiseen pintaan verrattuna.

Liekin levitessä pinnalla palon teho kasvaa nopeasti (usein verrannollisena ajan toiseen potenssiin). Kun kaikki pinnat liekehtivät, paloteho ei enää kasva vaan palo jatkuu polttoaineen kuluttamisena ellei sitä muut tekijät häiritse.

6.3 PALOTAPAHTUMIEN REKONSTRUOINTI

6.3.1 Palon numeerinen simulointi

6.3.1.1 JOHDANTO

Tulipalon rekonstruoinnilla saadaan yksityiskohtaista tietoa palon ajallisesta kehittymisestä. Tulipalon rekonstruointi on aina kallis ja aikaavievä toimenpide. Siten siihen on ryhdyttävä harkiten ja sillä tavalla, että saadaan vastauksia tärkeimpiin kysymyksiin. Täydellinen rekonstruointi, joka antaisi vastaukset koko palotapahtumaan, on tuskin koskaan mahdollista jo pelkästään sen vuoksi, että palon lähtötilanne jää monin osin tuntemattomaksi.

Jotta rekonstruktio olisi mielekäs, palopaikalta tarvitaan riittävä määrä havaintoja, joihin se voidaan kiinnittää ja joihin voidaan verrata sen antamia tuloksia. Siten rekonstruktion aluksi laaditaan tarkka aikajärjestyksessä etenevä tapahtumien luettelo, joiden perusteet kirjataan huolellisesti. Siitä laaditaan myös mittakaavainen aikasarja, jossa aikajanaan merkitään eri tapahtumat ja niiden ajalliset luotettavuusrajat. Näiden tietojen perusteella arvioidaan mahdolliset palotilanteet ja valitaan niistä todennäköisimmät jollakin järkevällä periaatteella, jonka perustelut kirjataan.

Palotilanteet analysoidaan sitten yksityiskohtaisesti vertaamalla olemassa olevaan havaintoaineistoon ja päätellään, voidaanko johtopäätökset tehdä jonkin osaprosessin perusteella vai tarvitaanko kokonaisvaltainen (moni)huonepalon rekonstruointi. Jälkimmäisessä tapauksessa on aina järkevää tehdä numeerinen simulointi mahdollisimman keveällä menetelmällä ja tarkistaa, antaako se

ennusteita, jotka edes likimäärin vastaavat tapahtumien oletettua kulkua. Simulointiin voi liittää myös herkkyysanalyysia tuntemattomien suureiden osalta antamalla esimerkiksi paloteholle oletetun arvon, laskemalla siitä aiheutuvan palon kehittymisen, sekä toistamalla laskenta 50 %:n ja 200 %:n palotehoilla. Tällä herkkyysanalyysilla voidaan sulkea nopeasti pois tekijöitä, joiden vaikutus lopputulokseen on vähäinen. Kun riittävä määrä karkeita simulointeja on tehty, voidaan katsoa, mitkä suureet ovat niin merkittäviä, että niiden mittaaminen rekonstruktiokelellä on järkevää.

Kun mittaukset osaprosesseista on tehty, ja karkeat simuloinnit osoittavat, että todistusaineisto on riittävää, jotta oletetun palotilanteen koko kulun tuntemisella voitaisiin ratkaista vielä tuntemattomaksi jääneitä asioita, kannattaa harkita kahta vaihtoehtoa: (1) tarkennettua palosimulointia vyöhyke- tai kenttämalleilla käyttäen syötteinä osaprosessien rekonstruktiokeleista mitattujen suureita ja (2) täydellisiä rekonstruktiokeleita.

6.3.1.2 MÄÄRITELMIÄ

Happirajoitteinen palo esiintyy tilassa, jossa käytännöllisesti kaikki käytettävissä oleva happi yhtyy polttoaineeseen. Tällaista tapahtuu huonetilassa lieskahduksen jälkeen, kun korvausilman määrä huonetilan aukoista rajoittaa palon tehoa.

Lieskahdus on ilmiö, jolloin hyvin nopeasti kaikki huonetilassa olevat *palavat* pinnat alkavat liekehtiiä. Lieskahduksessa paikallinen, polttoainerajoitteinen palo muuttuu nopeasti koko huonetilan käsittäväksi happirajoitteiseksi paloksi, jonka palotehoa rajoittaa aukoista saatavan korvausilman määrä.

Palopatsas on palopesäkkeestä kohoava liekkien, kuumien kaasujen, nokihiukkasten ja ympäristöstä mukaan tempautuvan ilman muodostama kohoava virtaus. Patsasta ylläpitää palosta syntyvien ympäröivää ilmaa kevyempien kaasujen nostevoima.

Polttoainerajoitteisessa palossa käytettävä polttoaineen määrä rajoittaa palotehoa. Alkupalon aikana palo on ensin polttoainerajoitteinen.

6.3.1.3 NUMEERISET SIMULOINTIMENETELMÄT

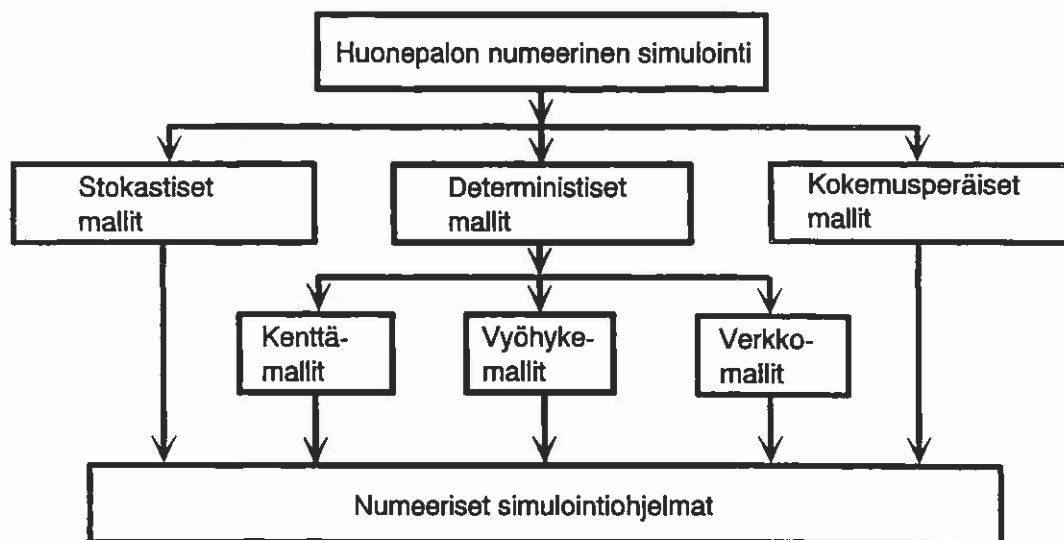
Huonepalo on tulipaloo kokonaan tai osittain rajatussa tilassa kuvaava tekninen termi vastakohtana palolle vapaassa tilassa. Huonepalon kulun tunteminen, palon kehittyminen, on rakennuksen tulipalon ymmärtämisen ja torjunnan keskeinen kysymys. Palo on monimutkainen kemiallisesti reagoiva monifaasi-, moniainevirtaus, jonka mallittaminen hallitaan vasta osittain.

Huonepaloo voidaan likimääräisesti kuvata erilaisilla malliyhtälöillä, jotka ratkaistaan numeerisesti. Menetelmien keskinäinen riippuvuus on esitetty kuvassa 6.3.

Oppikirjan tapaisia katsauksia huonepalon mallitustilanteesta on ilmestynyt vasta aivan viime vuosina. Niistä tärkeimpiä ovat: Cox (1995), Mitler (1991), Birk (1991).

Palotieteen ja tekniikan kannalta ratkaisevia ovat olleet teokset, joista on saanut nopeasti kuvan alan tieteellisestä ja teknisistä perusteista: Drysdalen (1985) oppikirja *An Introduction to Fire Dynamics*, DiNennon ym (1995) toimittama käsikirja *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, toinen painos sekä palamisen teoriaa käsittelevä Kuon (1986) erinomainen oppikirja *Principles of Combustion*.

Suomessa huonepalon numeerisesta simuloinnista Keski-Rahkonen laati erityisesti ydinvoimateollisuudelle laajan luottamuksellisen raportin. Sen aineistoa numeerisesta simuloinnista julkaistiin tilaajien luvalla *Palontorjuntatekniikka*-lehdessä suomenkielisenä artikkelisarjana (Keski-Rahkonen 1987, 1988b,c,d). Alkuperäinen artikkeli käännettiin myöhemmin englanniksi OECD:n käyttöön (Virolainen ym. 1993).



Kuva 6.3 Tulipalon numeeristen simulointiohjelmien eri tyypit ja niiden keskinäiset sukulaisuussuhteet (Keski-Rahkonen 1987).

6.3.1.3.1 MALLINNUSTAVAT

Numeerinen mallittaminen voi olla stokastista tai determinististä. Malleissa analysoidaan huonepalon kulku prosessiksi, jonka tärkeimpiä osia kuvataan matemaattisella teorialla.

Stokastista kehittyneemmät deterministiset mallit kuvaavat palotapahtumaa ankaran syy-seuraussuhteen edellyttämässä muodossa. Jos lähtötilanne on sama, mallin ennuste kulkee aina täsmälleen samaa polkua.

Deterministisen mallinnuksen käyttö on paloissa luonnollisinta kuvaamaan virtausmekaniikkaa, lämmön ja aineen siirtoa sekä kemian reaktioita. Deterministisellä mallilla voidaan kuvata hyvin myös tilanteita, joissa lähtötilanne on tuntematon tai huonosti määritelty.

6.3.1.3.2 DETERMINISTISTEN MALLIEN LUOKITTELU

Determinististen huonepalon simulointimallien yhtälöt joudutaan useimmiten ratkaisemaan numeerisilla likimenetelmillä. Numeerisen ongelman koko ja ratkaisun saamiseen tarvittava tietokonekapasiteetti riippuvat ratkaisevasti siitä, miten tutkittava tila jaetaan pienempiin alkioihin, koppeihin, joiden sisällä ratkaistavien muuttujien arvot oletetaan vakioiksi.

Vyöhykemallit

Tarkasteltava tila jaetaan pienempiin osiin, vyöhykkeisiin, jonka sisällä olosuhteet ovat kaikkialla samat paikasta riippumatta. Huonepalomalleista yksinkertaisimmat ovat yksivyöhykemalleja, yleisimmin käytetyt kaksivyöhykemalleja. Erikoistarkoituksiin käytetään myös useampia vyöhykkeitä.

Kaksivyöhykemallissa huonetila jaetaan vaakatasolla kahteen osaan: kuuman savukerroksen ja alemman viileän kerroksen välinen raja on melko terävä palon alkuvaiheessa.

Kaksivyöhykemallia voi näillä näkyminä pitää mallina, joka on palon kehittymistä laskevien suunnittelijoiden ja viranomaisten päätyökalu ainakin seuraavat kymmenen vuotta toimivuusajattelun perustalta lähtevässä paloturvallisuus-suunnittelussa. Vaikka malli on vielä kaukana kypsästä loppuun kehitetystä mallista, se on jo nyt käytännöllinen ja hyödyllinen työkalu.

Kenttämallit

Kenttämallit eli virtauslaskentamallit edustavat huonepalon mallinnuksessa raskainta kalustoa. Niillä on mahdollista myös kuvata paloa tarkimmin, koska ne käyttävät peruseriaatteista johdettavia säilymlakeja ja hyvin todennettuja muita tarvittavia malleja. Niiden varjopuolena on yhtälöiden monimutkaisuus sekä siitä johtuva tarvittava raskas laskentakalusto käytännön ongelmia ratkaistaessa.

Kenttämallissa palotilan lämpötila, kaasujen virtausnopeudet, pitoisuudet jne. ovat kenttäsuureita. Niillä on siten huonetilan jokaisessa pisteessä määrätty arvo tietyllä ajanhetkellä. Näille suureille kirjoitetaan kenttäyhtälöt ja suureiden alkua ja reunaehdot. Kenttämallin yhtälön rungon muodostavat kaasun virtausyhtälöt. Muuttujat ratkaistaan yhtälöistä ajan funktiona.

Kenttämalleilla voidaan kuvata myös huonetilassa olevien kohteiden lämpeneminen ajan funktiona, kun tilan lämpötila kohoaa palon vaikutuksesta.

Siten esimerkiksi huoneen kaapelien lämpeneminen on mallitettavissa, kun tunnetaan kaapelin materiaalit ja niiden asema huoneessa palopesäkkeeseen nähden.

Vaikka kenttämallit kuvaavat hyvin kaasun virtausta, niiden käyttö palo-ongelmissa kärsii samasta viasta kuin vyöhykemallien: ne eivät vielä kykene laskemaan palotehoa jähmeälle aineelle aineominaisuuksista lähtien. Kun paloteho tai vastaavasti massavirta palopesäkkeestä on annettava muilla keinoin, tulokset ovat vain niin hyviä kuin tämän lähdesuureen tarkkuus.

Verkkomallit

Kun palotila on lokeroinen, putkiverkosta muistuttava verkkomalli soveltuu parhaiten sen kuvaamiseen. Verkko- eli järjestelmämallissa koko järjestelmää kuvataan verkkomenetelmällä solmupisteinä ja niitä yhdistävinä haaroina. Kutakin solmupistettä, jota todellisuudessa vastaa huonetila tai sen osa, kuvataan keskitetyillä vakioilla, esimerkiksi lämpötilalla, jotka ovat samat koko solmupisteen tilavuudessa. Solmuista lähtevät virtaukset haaroja pitkin toisiin solmuihin. Verkkoyhtälöt, jotka turbulentin virtauksen kuvauksen vuoksi ovat epälineaarisia, ratkaistaan numeerisesti. Verkko-ohjelmistoja kehitettiin erityisesti ydinvoimateollisuuden tarpeisiin kuvaamaan radioaktiivisen aineiden leviämistä onnettomuustilanteissa. Ne soveltuvat kohtalaisesti myös lokeroisen huonetilan tulipalon laskemiseen.

Puhtaiden mallien lisäksi eri tyyppejä voidaan yhdistellä, jolloin niitä kutsutaan yleisesti yhdistelmämalliksi. Lupaavimmalta yhdistelmämalli näyttää parannettaessa kaksivyöhykemallin toimintaa ottamalla huomioon liikemäärän säilymlaki. Tämä on tärkeää siellä, missä liikemäärä on voimakas tekijä kuten kaasun virtauksessa pitkässä käytävässä.

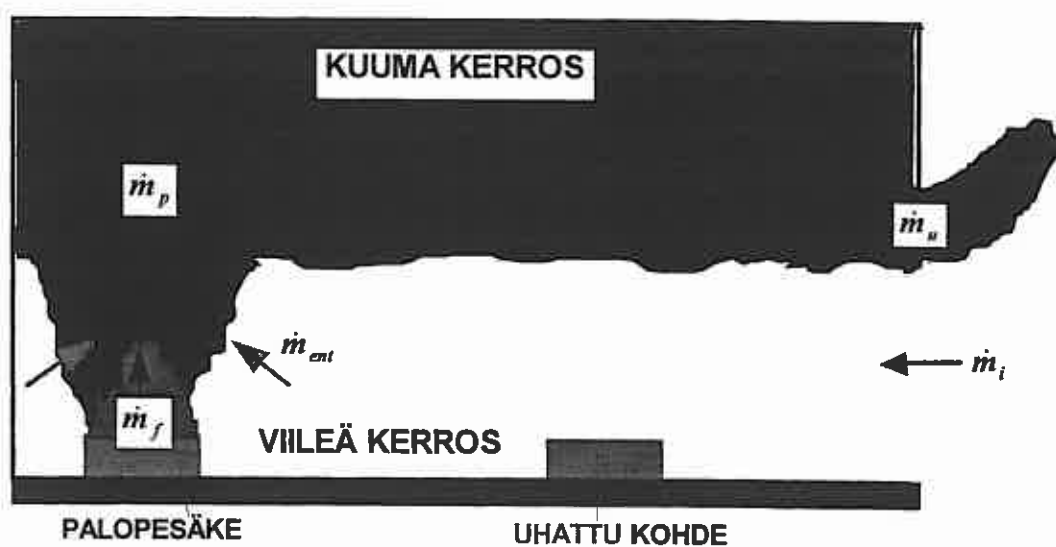
6.3.1.4 PALON KAKSIVYÖHYKEMALLI

6.3.1.4.1 YLEISTÄ

Huonepalon kaksivyöhykemalli eli 'savusaunamalli' on insinööriyöskentelyssä yleisimmin käytetty malli. Sen oleelliset kohdat ilmenevät kaaviollisesti kuvasta 6.4 (Mittler 1978). Suorakulmaista huonetilaa rajoittavat seinä, katto ja lattia ovat samaa ainetta. Yleisesti oletetaan niiden olevan palamattomia, vaikka se ei mallin kannalta ole välttämätöntä. Huoneesta johtaa yksi suorakulmainen aukko vapaaseen ulkoilmaan, josta kaasut virtaavat sisään ja ulos. Palo on keskittynyt pieneen pesäkkeeseen. Palosta vapautuva energia kuumentaa palokaasut sekä myös lähiympäristön ilmaa. Palopesäkkeen yläpuolelle muodostuu kaasupumppu, joka syöttää kuumia kaasuja ja siten myös energiaa palopesäkkeestä huoneen yläosaan, sillä kuumat kaasut ovat ympäröivää ilmaa kevyempiä. Huoneessa on myös palopesäkkeen ulkopuolella kohde, jonka syttymistä seurataan palon leviämisen ennustamiseksi. Palon alkuvaiheissa ovenkamanan rajoittamaan tilaan katon alle muodostuu savupatja. Sen reunan saavutettua kamanan tason savua

alkaa virrata ulos. Silti huoneen yläosan kuuma kaasupatja säilyy ja se kasvaa palon voimakkuudesta ja aukon suuruudesta riippuen huomattavastikin kamanan alapuolelle.

Kaksivyöhykemallissa huonetila jaetaan kahteen kerrokseen vaakatasolla (kuva 6.4). Yläkerroksessa kuuma savupatja ja alakerroksessa viileämpi, pääasiassa ulkoilmasta koostuva patja. Kuumia kaasuja virtaa aukon yläosasta ulos massavirralla \dot{m}_u . Korvausilmaa tulee aukon alaosasta sisälle massavirralla \dot{m}_i . Kaasukerrostojen välinen aineenvaihdunta määräytyy pääasiassa palopumpun, palopatsaan voimakkuudesta, joka työntää kuumaan kerrokseen savua massavirralla \dot{m}_p . Se taas riippuu palavasta aineesta, sen yläpuolelle muodostuvan liekin suuruudesta sekä huoneesta palopesäkkeeseen tulevasta kokonaislämpösäteilystä. Massavirta \dot{m}_p on palopesäkkeen polttoaineesta höyrystyvän massavirran \dot{m}_f ja palopatsaaseen viileästä kerroksesta haalautuvan lisäilman \dot{m}_{ent} summa.

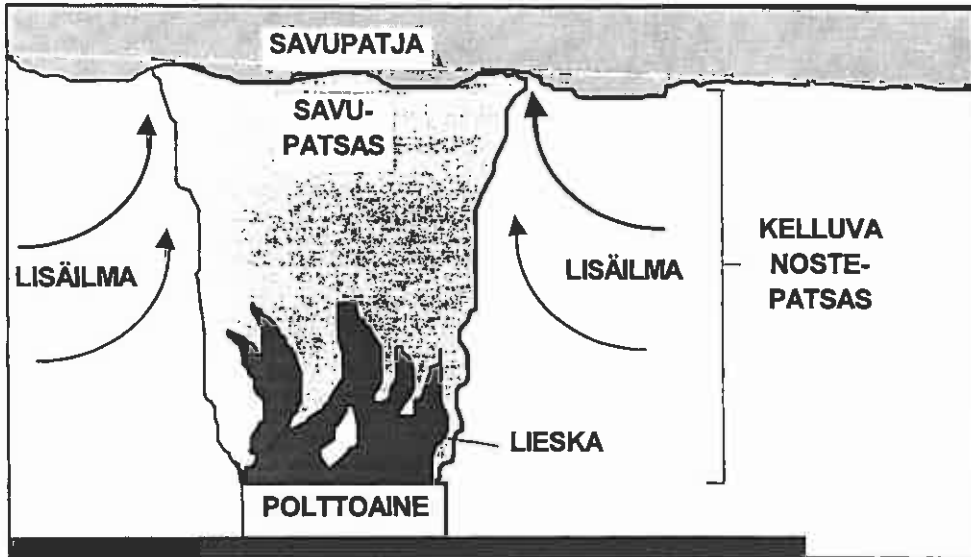


Kuva 6.4. Huonepalon kaksivyöhykemallin periaate (Mitler 1978).

6.3.1.4.2 PUMPPU

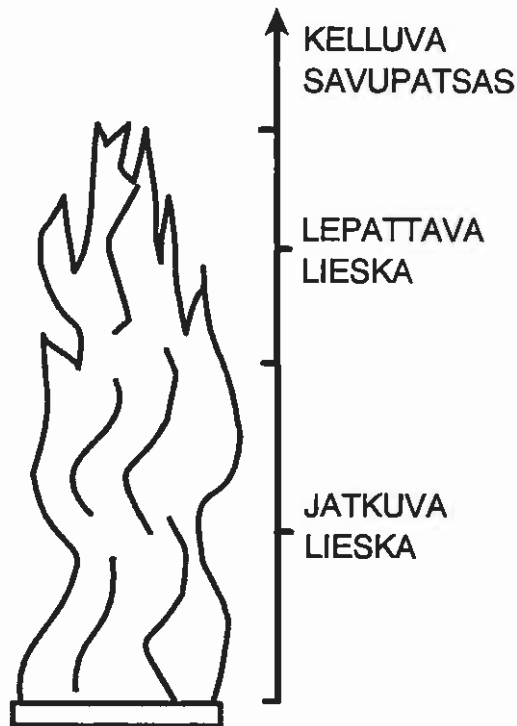
Vyöhykemalleissa palon voimakkuutta ohjaa pumppu, palopatsas, joka kuljettaa massaa ja energiaa kuumaan kerrokseen. Palopatsas koostuu McCaffreyn (1979) jaottelun mukaisesti kahdesta osasta: palopesäkkeestä suoraan kohoavaa liekkien kokonaisuutta kutsutaan lieskaksi ja niiden yläpuolella olevaa, väriltään ilmasta erottuvaa nousevaa kaasuvirtausta savupatsaaksi (kuva 6.5, Keski-Rahkonen 1987). Lieska kiinnittyy lähelle palavan aineen pintaa, ja liekehtiminen alkaa jonkin matkaa pinnan yläpuolelta alueelta, missä happea on saatavilla. Lieskan

alaosassa on koko palon aikana liekkiä (jatkuva lieska). Lieskan yläosa muuttuu koko ajan sekä pituus- että hieman vähemmän leveyssuunnassa. Lieskan häilyvää yläosaa kutsutaan lepattavaksi lieskaksi. Kuvassa 6.6 on havainnollistettu lieskan näitä piirteitä. Lieskan yläpuolella on kaukokenttä, jossa ei enää pala tai palamisreaktiot ovat hyvin hitaita. Tästä ylöspäin nousevat palokaasut muodostavat kelluvan savupatsaan.



Kuva 6.5. Palopatsaan osat ja niiden suomenkieliset nimet (Keski-Rahkonen 1987).

Vyöhykemallin olennaisimman osan muodostaa pumpun mallittaminen. Sen matemaattinen perusta voidaan laskea teoreettisesti olettaen palon kaiken energia vapautuvan pienessä tilassa (pisteessä). Tällä mallilla saadaan pumpun palopatsaan lämpötila-, tiheys- ja virtausnopeusjakautumat. Äärellisenkokoinen lähde voidaan käsitellä lähes samalla, virtuaalilähteen mallilla. Vertaamalla näiden teorioiden tuloksia kokeellisesti mitattuihin, on saatu käyttökelpoiset palopatsasmallit käytännössä tarvittaville tapauksille. Ne toimivat hyvin, jos virtauskenttä tilassa voidaan olettaa symmetriseksi palopatsaan akselin suhteen. Tarkkuus on silloin 10 %:n seutuvilla. Jos virtaus tulee yhdeltä suunnalta ja kallistaa patsasta, lisäilman haalinta kasvaa voimakkaasti ja patsas kallistuu. Tällöin mallia voidaan muuttaa vastaamaan paremmin kokeellisia tuloksia. Tarkkuus on vain silloin huomattavasti heikompi kuin 10 %.



Kuva 6.6 Kelluvan ja lepattavan lieskan osat (Drysdale 1985).

6.3.1.4.3 VIRTAUKSET AUKOISTA

Palossa syntyy nopeasti suuria määriä kaasumaisia palotuotteita. Huoneessa palon eteneminen määräytyy saatavissa olevasta happimäärästä. Siten virtaukset huoneesta ja huoneeseen ovat aivan ratkaisevan tärkeitä pääteltäessä, miten palo voi edetä. Mallinnuksessa aukot yksinkertaistetaan kahteen tyyppiin: pystysuoriin ja vaakasuoriin.

Kun aukko on pystysuorassa seinässä, virtaukset siitä on helppo mallittaa vyöhykemallia käyttäen. Pienet vaakasuorat aukot, joissa virtaus tapahtuu yhteen suuntaan ja jotka eivät ole tilan ainoat aukot, on myös helppo mallittaa. Sitä vastoin vaikea mallitettava ja pääosin vielä tuntematon alue on huoneen katossa oleva vaakasuora aukko, joka palon aikana toimii sekä korvausilman tuojana että savunpoistoaukkona. Aukossa virtaus on kaksisuuntaista joko koko ajan tai ajoittain suuntaa vaihtaen ja aina erittäin epävakaita.

6.3.1.4.4 LÄMPÖHÄVIÖT

Palossa huoneesta häviää lämpöä johtumalla, kuljettumalla ja säteilemällä. Kun huoneesta on avoimia aukkoja toisiin tiloihin, kuljettumisen osuus energian siirrossa on suurin. Seuraavana tulee säteily ja viimeisenä johtuminen. Lämmönsiirto kuljettumalla on tärkein paloa syttymiskohdan ulkopuolelle levittävä tekijä.

Kuumien kaasujen koskettaessa huonetilan seiniä tai kattoa kuljettuu tai säteilee lämpöenergiaa rakenteen pinnalle (kuva 6.7, Cox 1995). Siinä lämpö johtuu rakenteen läpi ja siirtyy lopulta vastakkaiselta pinnalta sitä ympäröivään ilmaan. Tämä on esitetty lämpövirran tiheyttä osoittavalla nuolella (6). Palotehon pienetessä kuumentunut seinäpinta voi myös luovuttaa energiaa kaasulle palotilassa, jos sen lämpötila on seinän lämpötilaa alempi.

Suurin osa palon energiasta kuljettuu palokaasujen mukana aukoista ulos tai naapurihuoneisiin. Voimakkaassa palossa kaasujen mukana kulkeutuu myös palamatonta, höyrystynyttä tai pyrolysoitunutta polttoainetta, joka ei huoneessa ole saanut hapetta palaakseen. Kun tämä kaasu kuljettuu toiseen huoneeseen tai ulkosalle, se voi syttyä liekkiin, mikäli hapetta on saatavilla ja kaasujen lämpötila on kyllin korkea.

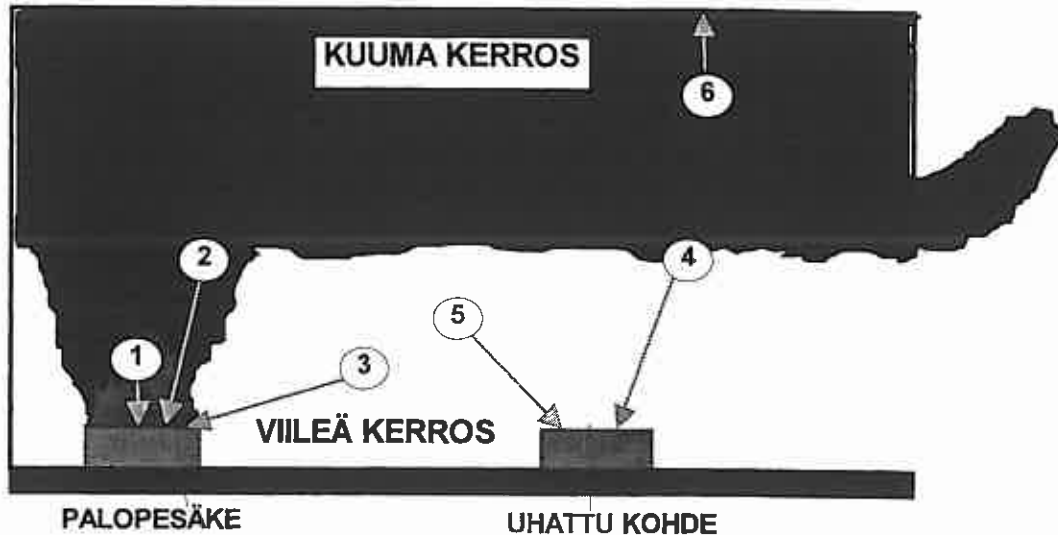
Noin kolmannes palossa vapautuvasta energiasta siirtyy lämpösäteilynä. Palopesäkkeen lieska säteilee kuumaan kaasukerrokseen ja ympäröiviin rakenteisiin. Se kuumentaa myös seuraavaa kohdetta, joka voi syttyä säteilystä liekkien sitä koskettamatta, kun energian siirto on nostanut kohteen pintalämpötilan kyllin korkealle.

Osa lieskan, rakenteiden ja kaasun säteilystä menee aukoista suoraan huonetilan ulkopuolelle naapurihuoneisiin tai ulos. Yksinkertaisimmissa malleissa, kuten kuvan 6.7 esittämässä tapauksessa, tämä suoraan aukoista lähtevä säteily jätetään ottamatta huomioon.

Koska paikallisen lieskan pinta-ala on pieni huoneen vaipan pinta-alaan verrattuna ja tilavuus pieni huoneen tilavuuteen verrattuna, lämmönsiirto lieskasta muihin kohteisiin palopesäkettä lukuunottamatta ei ole korkeasta lämpötilasta huolimatta merkittävä. Seinäpintojen ja kaasu-patjan säteily on otettava merkittävinä tekijöinä huomioon yksinkertaisimmissakin kaksivyöhykemalleissa.

Polttoaineen palamisnopeuteen vaikuttaa sen pinnalle tuleva lämpösäteilyvirran tiheys. Eri säteilykomponentteja on kuvassa 6.7 esitetty nuolilla. Huomattava osa palamiseen vaikuttavasta lämpösäteilystä tulee palopesäkkeeseen lieskasta (nuoli 1) ja savupatsaasta (2). Tämän lisäksi siihen tulee säteilyä huonetilan pinnosta (3).

Tarkasteltaessa palon leviämistä huonetilassa säteilylämpö on merkittävä tekijä myös uhatun kohteen sytyttämisessä (kuva 6.7). Kun palo on paikallinen, suoraan lieskasta tulee jonkin verran säteilyä ohatun kohteen pinnalle, mutta tavanomaisissa huonetiloissa savupatjasta (4) ja kuumista pinnoista (5) tuleva säteily ovat liekin suoraa säteilyä merkittävämmät. Huonetilaan kertynyt kaasupatja toimiikin tehokkaana palon levittäjänä palon alkuvaiheissa.



Kuva 6.7. Erilaiset säteilylämmönsiirtomuodot kaksivyöhykemallin kuvauksessa (Cox 1995).

6.3.1.4.5 MONIHUONE- JA MONITASOMALLIT

Edellisissä esimerkeissä on käsitelty vain yhden huoneen mallia. Kaksivyöhykelaskenta on ulotettavissa monihuoneiseen, monessa tasossa olevaan rakennukseen ilman suurempia muutoksia käsittelemällä kutakin huonetilaa erikseen. Huoneita yhdistävien aukkojen tasoissa esitetään massa- ja energiataseet. Useimmat kaksivyöhykeohjelmistot kykenevät laskemaan tarpeellisen määrän huonetiloja. Useissa ohjelmistoissa yksityiset huoneet voivat myös sijaita eri tasoissa. Huoneiden ja tasojen määrää rajoittaa ainoastaan koneessa käytettävän muistin määrä. Käytännössä kymmenen huonetilaa on suurin tarvittava määrä, jos ongelma käsitellään fysikaalisesti oikein. Sen laskeminen onnistuu vielä isossa mikrotietokoneessa pyörivällä ohjelmalla.

6.3.1.5 LÄMMÖN SIIRTYMINEN RAKENTEISIIN

Kuuma kaasupatja joutuu kosketuksiin rakenteiden kanssa. Patjasta siirtyy lämpöä kuljettumalla ja säteilemällä niiden pintaan ja johtumalla syvemmälle rakenteisiin.

Rakenteen lämpötila määritetään ratkaisemalla numeerisesti lämmönjohtuvuusyhtälö soveltaen rakenteen tulen puoleiseen pintaan kuumista kaasuista kuljettuvaa ja säteilevää reunahtoa. Käytännössä rakenteet lasketaan lähes aina yksiulotteisilla mallilla, mutta huoneessa saatetaan joutua kolmiulotteiseen mallitukseen joidenkin osien tapauksessa.

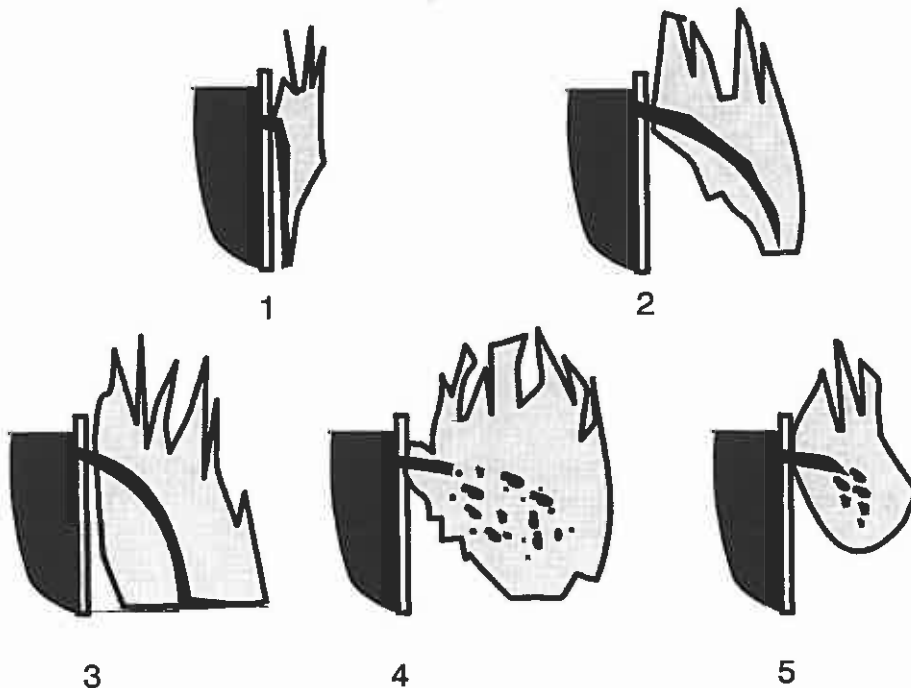
Lämmönjohtavuusyhtälö on vyöhykemallien ainoa osittaisdifferentiaaliyhtälö. Se voidaan ratkaista numeerisesti likimäärin differenssimenetelmällä.

Kun rakenteet ovat joko erittäin hyviä lämmönjohteita tai hyviä eristeitä, lämmönjohtavuusyhtälön ratkaiseminen saattaa tuottaa vaikeuksia laskennan suppenemisessa.

6.3.1.6 HUONEPALON LASKEMINEN

6.3.1.6.1 PALOTEHON MÄÄRITTÄMINEN

Huoneessa palokuormat ovat kalusteita, rakenteita, palavia nesteitä (polttoöljy, voitelu- ja hydraulioöljyt, liuottimet), kaapeleita, lämmöneristeitä ja pintakäsittelykerroksia (maalit). Palotehon määrittämiseen ei ole paljon standardisoituja menetelmiä vaan se on arvioitava tapauskohtaisesti. Palo voi olla joko paikallinen tai koko huonetilaan leviävä ja sitten lieskahdukseen johtava. Kun palokuormana on palava neste, määrittäminen on yksinkertaista. Palotyypit ovat (kuva 6.8): (1) valuva kalvo, (2) nestesuihku, (3) palava lammikko, (4) hajasumu ja (5) höyrystysuuhku, (Kanury 1981). Yleisin näistä on lammikkopalo, mutta vaarallisin hajasumu tai höyrystysuuhku, joita paineisten nesteiden vuodossa voi esiintyä. Palotehon arviointi perustuu niissä tapauksissa vuodon suuruuden määrittelyyn, joka on rakenteellisten seikkojen perusteella mahdollista. Lammikkopalon teho saadaan lammikon pinta-alan sekä nesteen palamislämmön ja höyrystyslämmön suhteesta.



Kuva 6.8 Vuotavan nesteen erilaiset palotyypit (selitys tekstissä), (Kanury 1981).

Kaapelien palotehon määrittäminen on periaatteessa vaikeampaa, mutta toimiva menetelmä on arvioida suurin mahdollinen paloteho käyttäen todellisella materiaalilla tehtyä kartiokalorimetrikokeen tulosta.

Palotehon määrittämisessä huonetilan ilmansaanti on otettava huomioon. Aivan alkuvaiheessa palo on polttoainerajoitteinen. Kaikki liekkien ulottuvilla oleva aine

palaa. Palon kasvaessa se saavuttaa happirajoitteisen tilan. Happirajoitteinen paloteho on helposti laskettavissa hapenkulutuskalorimetrian perusteella käytettävissä olevasta happimäärästä. Yhtä ilmakiloa kohden kaikista aineista vapautuu 2,97 MJ energiaa. Koneellisen ilmanvaihdon tapauksessa laskeminen on aivan yksinkertaista ja painovoimaisenkin ilmanvaihdon (esiintyykö huoneessa) tapauksessa helposti tehtävissä.

Suihkuavissa nestepaloissa palon voidaan olettaa saavan täyden tehonsa heti vuodon alkaessa. Lammikkopalossa liekki leviää nesteiden pinnalla mittauksista tunnetulla, suurella nopeudella. Esimerkiksi vain jähmeätä ainetta sisältävässä kohteessa palon kasvunopeutta voidaan arvioida NFPA:n standardin mukaan neljänä luokkana: hitaasti, tavanomaisesti, nopeasti ja erittäin nopeasti kasvavana palona. Nämä kasvunopeudet ovat hitaita palon leviämisenopeuksiin nesteiden pinnalla verrattuna. Tällä mallilla saadaan lasketuksi kriittisten tilanteiden esiintymisen ajankohta.

6.3.1.6.2 PALON LASKEMINEN HUONETILASSA

Huomattava osa huonepalo-ongelmia voidaan simuloida monihuone-, monitasovyöhykemalleilla, jotka sisältyvät ohjelmistopaketteihin BRI2 (Tanaka 1987) ja CFAST (Peacock ym. 1993), jotka ovat olleet pitkään käytössä VTT Rakennustekniikassa. Tietyissä erityistapauksissa, jos on käytettävissä riittävät aika- ja raharesurssit, vyöhykemallilla saatavaa tulosta voidaan tarkentaa kentämalleilla kuten SOFIE:lla (Cox 1994), jos siihen on selvä perusteltu tarve. Joissakin tapauksissa palo on niin paikallinen, että esim. sen leviäminen on helpoimmin arvioitavissa ilman simulointia suorista kokeellisista korrelaatiokaavoista.

Mallinnuksen ohjeena voidaan käyttää yleistä rakennuksen tulipalon toimivuusajatteluun perustuvaa menetelmää. Pohjoismaisen palomääräyskomitean (Funktionsbestemte brandkrav, 1994) ehdotus mallikoodiksi on eräs mahdollisuus, jossa esitetyt periaatteet ovat kaikissa vastaavissa menetelmissä. Mallinnus aloitetaan miettimällä todennäköinen kohteessa mahdollisesti sattunut palotilanne. Sen polttoaineen laatu ja määrät kartoitetaan. Arvioidaan syttymismahdollisuudet ja kuvataan syttymismekanismi. Harkitaan tarvittava mallinnustapa (paikallinen palo, vyöhykemalli, kenttämalli). Simulointimalli rakennetaan tämän kohdan ympärille arvioimalla sitä silmävaraisesti.

Monihuoneisella vyöhykemallilla laskettaessa palo-osastosta rajataan syttymiskohdan ympäristöstä muutama huonetilä. Simulointia varten todelliset huoneet muutetaan suorakulmaisiksi säilyttäen korkeus- ja tilavuussuhteet. Väliseinät otetaan malliin mukaan vain siellä, missä ne vaikuttavat olennaisesti palon leviämiseen. Loppuosa palo-osastosta toimii vain savusiilona. Nämä huoneet yhdistetään yhdeksi tilaksi laskennan yksinkertaistamiseksi. Malliin voidaan lisätä myös uusia näennäisiä seinä- tai kattopintoja, jos niiden avulla uskotaan päästävän tarkempaan tulokseen. Näin saatua mallia kutsutaan tilan pelkistetyksi malliksi. Jos laskenta tehdään kenttämallilla, menettely on sama paitsi epäoleellisista yksityiskohdista riisutun tilan kuvaus on tehtävä kolmiulotteisesti todellisten mittojen mukaan.

Paloteho arvioidaan kohdassa 6.3.1.6.1 esitetyllä tavalla. Reunaehtoina laskentaan syötetään lämpötilat huoneiden ulkopuolella, virtaukset (ilmanvaihto) ulkopuolelta ja ulkopuolelle sekä vallitseva ilman paine ja tuulen nopeus. Alkuehtoina annetaan rakenteiden ja kaasun lämpötilat sekä paineet syttymishetkellä. Käytännön vaikeutena on löytää materiaalitietoja mallitettaville komponenteille. Grossin (1985) kokoelma kattaa osan yleisistä rakennusmateriaaleista, mutta muiden aineiden osalta on nojaututtava joko valmistajan antamiin tietoihin tai suoriin mittauksiin. Paloteknisten suureiden osalta kartiokalorimittaukset ovat monipuolisesti käyttökelpoisia simuloinnissa.

Simuloinnilla lasketaan lämpötilan kehittyminen ajan funktiona eri huonetiloissa niiden kuumassa ja kylmässä kerroksessa, kuumen kerroksen rajapinnan korkeus lattiatasosta, hapen ja palokaasujen pitoisuudet, noen pitoisuus, näkyvyys, sekä paineet ja massavirrat ja virtausnopeudet aukoissa. Tilojen rajapinnoilla lasketaan pintojen lämpötilat ja säteilylämpövirrat.

Näiden tulosten perusteella lasketaan simulointiohjelmien ulkopuolella havaittuja ilmiöitä, komponenttien vaurioitumista ja erityisesti tilanteen ajallista kulkua. Useimmissa tapauksissa tarvitaan vain muutamia simulointiohjelman tulostamia suureita arvioinnin perustaksi. Esimerkiksi seinän tai katon lämpiämisen arviointiin tarvitsemme vain kaasun lämpötilan niiden lähellä sekä säteilylämpövirran pinnalle ajan funktiona. Lämpeneminen voidaan sitten laskea myös erillisenä ongelmana palon simuloinnin jälkeen.

Palon ja rakenteiden vuorovaikutus on palon alkuaikoina heikko. Tämä merkitsee sitä, että palon simulointi voidaan tehdä erikseen ottamatta huomioon yksityisen rakenteen lämpötilan kehitystä palon kulkuun. Huonetilan seinät mallitetaan keskimääräisellä tavalla niiden lämmönjohtavuuden ja lämpökapasiteetin huomioon ottaen. Muiden komponenttien vaikutus palon kulkuun voidaan ensiarviossa jättää ottamatta huomioon.

6.3.1.7 SIMULOINNIN ARVIOINTI

Tulipalon numeerinen simulointi huonepalojen arvioijana on hyvin monipuolinen työkalu. Sillä voidaan ratkaista käytännössä vaadittavalla tarkkuudella lähes kaikki esiin tulevat luonnontieteelliset kysymykset. Ennen simulointeihin ryhtymistä on tehtävä mahdollisten tilanteiden arviointi joko muodollisella menetelmällä kvantitatiivisesti tai helpoissa tapauksissa asiantuntija-arviona lautamiesjärjellä kvalitatiivisesti. Analyysin tulokset on aina raportoitava menetelmästä riippumatta perusteltaessa simulointitilanteiden valintaa. Simuloinnilla voidaan sitten sulkea pois epätodennäköisiä tai tosiasioiden vastaisia oletettuja tapahtumien kulkua.

Simuloinnin kustannukset riippuvat ensiksi tarkasteltavien tilanteiden lukumäärästä. Siksi riskianalyysillä vaihtoehdot olisi karsittava minimiin. Toiseksi kustannukset riippuvat käytetystä tarkkuudesta (=ohjelmatyypistä). Karkeasti voidaan sanoa, että yhden tilanteen simulointi vyöhykemallilla on yhden henkilön päivän, enintään muutaman päivän työpanos. Kenttämallisimulointi on tyypillisesti kuukauden työpanos. Käytettäessä erilaisia

paikallisen palon malleja ilman simulointia työpanos on päivästä viikkoon. Lämmönsiirron laskenta 1- ja 2-ulotteisissa tapauksissa on alle päivän työpanos; kolmiulotteisissa tapauksissa tyypillisesti muutamasta päivästä viikkoon. Tietokonekustannukset eivät työajan rinnalla ole merkittäviä vyöhykemallinnuksessa ja kentämalleillakin ne ovat pienehköt.

Tulipalon numeerinen simulointi on käyttökelpoinen työkalu pantaessa kvantitatiivisesti paremmuusjärjestykseen erilaisia mahdollisia ratkaisuja. Jo karkeilla malleilla saadut nopeat arvioinnit saattavat paljastaa ongelmasta olennaisen kohdan. Mallinnuksen tarkkuutta voidaan lisätä parametritarkasteluna. Tällä tavalla selviää keskinäinen järjestys vaikka monet mallin syötteistä olisivatkin epävarmoja, kuten käytännössä on usein asian laita.

6.3.2 Kokeelliset palorekonstruktiot

6.3.2.1 PALON KEHITTYMISEEN LIITTYVÄT REKONSTRUKTIOKOKEET

Palon kehittymistä voidaan myös tutkia kokeellisilla palorekonstruktioilla, missä todellista tilannetta jäljitellään mahdollisimman tarkasti. Kokeet voivat kuvata palon syttymisvaihetta, leviämisvaihetta syttymisen jälkeen, kokonaiskehitystä tai osaprosessia. Kokeet voivat olla pieniä, esimerkiksi tietyn laitteen tai sen osan toimintaan liittyviä tai huomattavan laajoja, esimerkiksi kuvata palon kehittymistä huoneessa, rakennuksen osassa tai koko rakennuksessa.

Kokeiden tuloksina voidaan esimerkiksi saada lisätietoja laskennallisia malleja varten, selvittää ovatko tietyt syttymismekanismit mahdollisia tai todennäköisiä, vahvistaa tai sulkea pois palon leviämisen vaihtoehtoja tai saada tietoa palon ajallisesta kehitymisestä. Kokeissa voidaan selvittää paloilmoittimien toimintaa palon aikana, mikä tieto yhdistettynä hälytyskeskusten rekisteröimiin aikoihin voi auttaa palon ajallisen etenemisen selvittämisessä.

Kokeiden suorittamisessa on tärkeitä, että

- käytetyt materiaalit ja laitteet sekä ympäristö ovat mahdollisimman samanlaiset kuin itse tulipalossa
- koejärjestely suunnitellaan palotapahtuman perustellun työhypoteesin pohjalta.

Erityisesti rekonstruktiokeiden teettäjän on muistettava, että koe vastaa vain juuri siihen esitettyyn kysymykseen, mitä osoittamaan se on suunniteltu. Siten esimerkiksi yritettäessä sytyttää tulitikulla tiettyä nestettä ja tuloksen ollessa negatiivinen, koe ei osoita, etteikö tätä nestettä olisi käytetty palon tahalliseen sytyttämiseen. Jos tulitukun sijasta sytyttämiseen onkin alunperin käytetty suurempaa liekkiä, neste on saattanut hyvinkin toimia alkupalon huomattavana nopeuttajana ja edistää vahinkojen syntymistä. Koska mahdollisuuksien kirjo on lähes loputon, kaikkien mahdollisten tapausten kokeileminen on harvoin mahdollista, ja siten rekonstruktioilla onkin pyrittävä vahvistamaan tai kumoamaan jo muuten hyvin yksityiskohtaisesti luonnehdittu palotapausten kulku.

Kokeissa tehdään havaintoja ja mitataan erilaisia paloa kuvaavia fysikaalisia suureita tarvittavan tiedon määräästä, koetta suorittavan laboratorion varustelutasosta ja käytettävissä olevasta rahamäärästä riippuen.

Kokeen suorittamisen minimivarustus on sekuntikello, kamera ja videokamera. Tuloksena on silloin taulukko havaintoja eri ajanhetkinä, koetta selittäviä valokuvia, tarvittaessa piirroksia koejärjestelyistä sekä videonauha. Tämä on usein riittävä koejärjestely, jos kokeen tarkoituksena on selvittää tietyn tapahtuman mahdollisuutta tai tapahtumasarjan ajallista etenemistä.

Hankittaessa kvantitatiivista tietoa palon kehittymisestä esimerkiksi sen mallittamista varten, kokeisiin lisätään erilaisia mittausantureita. Mitattavia suureita ovat esimerkiksi paloteho, säteilyvirrantiheys sekä pintojen- ja kaasun lämpötilat ajan funktiona. Kokeen kustannukset nousevat silloin melkoisesti.

Kohdassa 6.3.2.2 esitetään esimerkki tulipalon rekonstruktiokekeesta.

6.3.2.2 ESIMERKKI PALON REKONSTRUKTIOKOKEESTA

Tulipalo

Esimerkkinä tulipalon rekonstruktiokekeesta esitetään Virtain kunnalliskodin palon selvityksen yhteydessä suoritettu koe. Sisäasiainministeriö asetti tutkijaryhmän paloa selvittämään, jonka raportin yhteenvedoista seuraava esitys perustuu (Palontorjunta 1979, Weckman 1987).

Tulipalossa tuhoutui lähes täysin puurakenteinen kunnalliskoti ja 27 henkilöä menehtyi palossa. Tehtyjen havaintojen perusteella on oletettu, että palo sai alkunsa yhdestä potilashuoneesta ja että palon syynä oli huolimaton tulenkäsittely (kielletty tupakointi sängyssä). Sängystä palo levisi huoneen verhoihin, näistä huoneen välikaton pintaan ja edelleen suojaverhouksen ja puurakenteen väliseen ilmaräiviin sekä sitten vesi- ja keskuslämmitysputkia ympäröivien koteloiden muodostamien ilmaräivien kautta muihin huoneisiin.

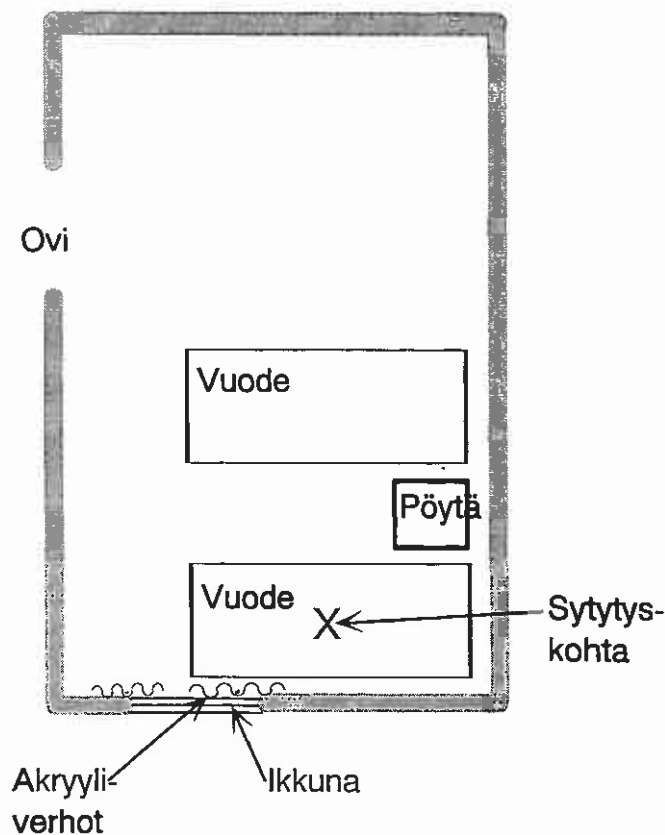
Huoneessa palon syttymisen ja leviämisen kannalta tärkeimmät sisusteet olivat vuoteet ja akryyliverhot. Vuoteissa oli kangaspäällysteinen vaahtokumi- tai vaahtomuovipatja, jonka päällä oli muovikalvosuoja, kangaslakana sekä poikkilakana alapinnalta muovia ja yläpinnalta paperia. Vuoteissa oli myös päänalus ja peitto. Joissakin vuoteissa oli myös kroonikkovaippa.

Palon jälkeisissä tutkimuksissa todettiin, että verhot, patjan muovikalvosuoja ja poikkilakana olivat herkästi syttyviä. Patjakangas, kangaslakana ja kroonikkovaippa olivat tavanomaisesti syttyviä. Mikään vuoteessa ollut tekstiili ei ollut vaikeasti syttyvä. Tutkitut vuoteiden tekstiilit eivät syttyneet palavasta savukkeesta.

Rekonstruktio

Kunnalliskodin palo oli syttynyt ja levinnyt hyvin nopeasti. Palon alkuvaiheen selvittämiseksi suoritettiin rekonstruktio kunnalliskodin palamattoman osan huoneessa, joka tilavuudeltaan vastasi huonetta, jossa palon oletettiin syttyneen.

Huoneen kalustuksena oli alkuperäistä vastaavalla tavalla kaksi vuodetta tarvikkeineen, yöpöytä sekä akryyliverhot. Huoneen ikkuna oli kolmilasinen ilmatiivis ikkunaelementti. Rekonstruktiokeksen huoneen periaatepiirustus esitetään kuvassa 6.9. Koehuoneen kattoon oli kokeen ajaksi kiinnitetty 70 °C:n lämpötilassa laukeava lämpöilmaisin sekä 6 termoparia, joiden tuntoelimet olivat noin 50 mm katon alapuolella.

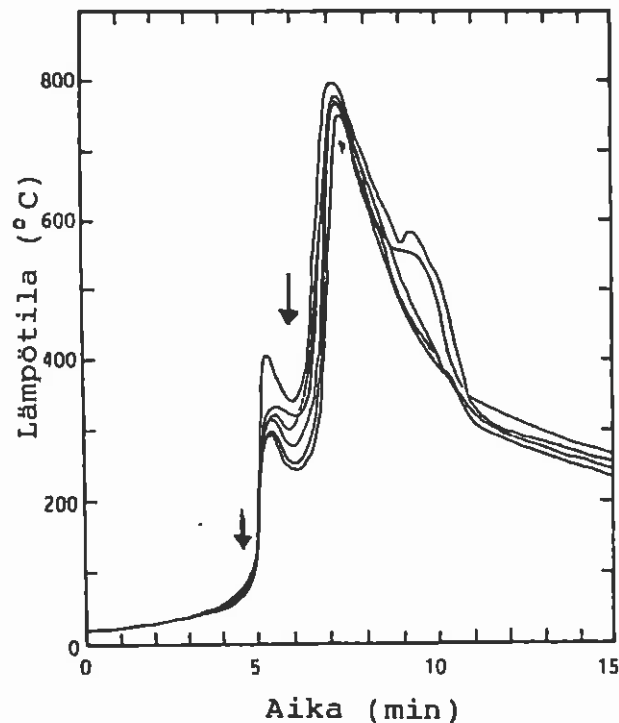


Kuva 6.9. Virtain kunnalliskodin palon syttymistä kuvaavan rekonstruktiokeksen järjestely (Palontorjunta 1979). Palo sytytettiin pudottamalla palava tulitikku kohtaan X.

Palo sytytettiin pudottamalla palava tulitikku ikkunan viereisen sängyn poikkilakanan keskelle. Taulukossa 6.1 esitetään rekonstruktiokeksen aikana tehtyjä havaintoja. Kuvassa 6.10 esitetään huoneen katonrajassa mitattuja lämpötiloja.

Taulukko 6.1. Virtain kunnalliskodin palon rekonstruktiokokeen aikana tehtyjä havaintoja (Weckman 1987).

Koeaika (min:s)	Havainto
0:00	Sytytys pudottamalla palava tulitikku ikkunan viereisen sängyn poikkilakanan keskelle. Palo etenee hitaasti savuttamatta.
n. 2:00	Palo saavuttaa patjan reunan. Palava patja savuaa runsaasti.
4:30	Verho syttyy. Palavia pisaroita tippuu runsaasti ja ne levittävät paloa.
4:55	Verho on palanut loppuun.
5:15	Ensimmäinen lasiruutu rikkoutuu.
5:30	Toinen lasiruutu rikkoutuu.
5:50	Kolmas lasiruutu rikkoutuu.
6:30-7:30	Huone lieskahtaa.



Kuva 6.10. Virtain kunnalliskodin palon rekonstruktiokokeen aikana huoneen katonrajassa mitattuja lämpötiloja (Weckman 1987). Nuolilla on merkitty verhon syttyminen (4 min 30 s) ja kolmannen (uloin) lasiruudun rikkoutuminen (5 min 50 s).

Huoneen katonrajassa ollut lämpöilmaisin laukesi 6 min:n 30 s:n kuluttua sytytyksestä.

Kokeen tuloksista huomattiin, että verhojen sytyttyä lämpötila huoneen katossa nousi nopeasti alle 100 °C:sta 300 ... 400 °C:een. Kolmannen ja uloimman lasiruudun rikkoutumisen jälkeen lämpötilat katossa nousivat nopeasti tasolle 750 ... 800 °C, jolloin huone lieskahti.

Rekonstruktio koe vahvisti oletukset palon nopeasta alkamisesta ja leviämisestä, jota erityisesti herkästi sytyivät verhot olivat nopeuttaneet.

6.3.2.3 MATERIAALIOMINAISUUKSIEN TUTKIMINEN STANDARDI-KOEMENETELMILLÄ

Vaikka monen materiaalin palo-ominaisuudet ovat summittaisesti tiedossa, käytännössä palossa mukana olleen materiaalin koostumusta tai muita ominaisuuksia ei tunneta riittävällä tarkkuudella. Sellaisen näytteen palo-ominaisuudet voidaan silloin selvittää standardipalotesteillä.

Palotestejä on hyvin suuri määrä erilaisten aineiden turvallisuusluokittelua varten. Useimmista niistä ei ole suurta hyötyä tutkittaessa palon kehittymistä kvantitatiivisesti. Muutamat aivan uusimmista paloteknisten materiaaliominaisuuksien testauslaitteista on suunniteltu mittaamaan luonnontieteellisesti hyvin määriteltyjä suureita ja ne soveltuvat palonsyöntutkijan apuvälineiksi. Tällainen materiaalien ja tuotteiden palo-ominaisuuksien tutkimus- ja testauslaite on nyky-aikainen kartiokalorimetri (ISO 5660-1, 1993) tärkeimmän esimerkin esitelläksemme. Laitteella voidaan muun muassa tutkia sellaisia perusominaisuuksia kuin syttyvyys, paloteho, savuntuotto, palamislämpö sekä syntyvien myrkyllisten palamiskaasujen pitoisuuksia. Kartiokalorimetriin tarvittavien näytepalojen koko on 100 mm x 100 mm ja paksuus korkeintaan 50 mm.

Muita tärkeitä testejä ovat: (a) palavien nesteiden leimahduslämpötilan määrittäminen joka suljetun (ISO 2719 (1988), EN 57 (1984), ISO 3679 (1983), ISO 1516 (1981)) tai avoimen (ISO 2592, 1973) upokkaan menetelmällä, (b) nesteiden itsesyttymislämpötilan määrittäminen Le Châtelier'n pyrometrillä (DIN 51 794, 1978), (c) aineen lämpöarvon määrittäminen pommikalorimetrillä (ISO 1716, 1973) ja (d) huokoisten jähmeiden aineiden itsesyttymislämpötilan (NT Fire 045, 1992) testausmenetelmä. Kartiokalorimetrin näytettä suurempien kvantitatiivisten palokokeiden tekemisessä sovelletaan palokammiokoetta varten kehitettyjä näytteen punnitusta palamisnopeuden mittaamiseen sekä hapenkulutuskalorimetriä palotehon mittaukseen (ISO 9705, 1993). Räjähdysominaisuuksien testauksessa käyttökelpoisia testimenetelmiä ovat kaasun syttymisrajan ja minimisyttymisenergian määrittäminen Cowardin-Jonesin putkella (1952, standardisoimaton, mutta eri maissa käytössä) sekä Siwekin 20 l pallo pölyräjähdysten luokitteluun (ISO 6184-1, 1985).

Tietoa tulipalossa olevien materiaalien palo-ominaisuuksista voidaan käyttää palon syttymisen ja kehittymisen arvioinnissa.

7. AJONEUVOPALOT

7.1 YLEISTÄ

Ajoneuvopaloja pidetään yleensä hankalina tutkia. Ongelmia ovat autojen mahdollinen nopea tuhoutuminen kokonaan, niiden sisältämä usein huomattava polttoainemäärä ja monet sähkö- ym. laitteet, jotka saattavat sytyttää tulipalon. Palanut alue on toisaalta yleensä melko pieni ja yksityiskohtaisesti tutkittavissa. Autojen massatuotannon vuoksi samanmallinen palamaton auto löytyy yleensä vertailukohteeksi.

Kuten yleensäkin palonsyiden tutkimuksissa vain harvoin voidaan suoraan osoittaa tiettyä kohtaa ja sanoa, että siellä on syy, vaan tilanne on nähtävä kokonaisuutena (Vertaa kohdan 4.4 ajatuksia)

Taulukoissa 7.1 - 7.3 esitetään tilastotietoa autopalojen syistä. Tilastot ovat yhdysvaltalaisia ja vanhahkoja, mutta lienevät suuntaa-antavia nykyoloissakin. Tilastoissa tuntemattomiksi jääneiden tapauksien osuus on huomattava ja se saattaa vääristää syiden jakaumaa, erityisesti tuhopolttojen osuudelta.

Taulukko 7.1. Henkilöautojen palojen syttymisalueita Yhdysvalloissa 1973 (McGinley 1986, s. 13 - 21). Tutkimukseen sisältyi 2325 tapausta, joista selvittämättömien alueiden osuus oli 17 %. Kolaritapausten osuus kaikista selvitetystä tapauksista oli 4 %. Pyörityksien takia summat eivät ole 100 %.

Syttymisalue	Tapaukset ilman kolaria	Kolaritapaukset
	Osuus selvitetystä alueista (%)	Osuus selvitetystä alueista (%)
Moottoritila	59	54
Matkustamo	35	4
Polttoainesäiliö	3	33
Tavaratila	2	4
Renkaat/jarrut	2	4

Taulukko 7.2. Michiganissa 1976 - 1977 tutkittujen henkilöautojen palojen syttymisalueet (Cooley 1981). Palojen kokonaislukumäärä oli 26565. Pyörityksien takia summat eivät ole 100 %.

Syttymisalue	Osuus kaikista paloista (%)	Osuus selvitetystä alueista (%)
Moottoritila	39	62
Matkustamo	20	32
Polttoainesäiliö	2	3
Tavaratila	1	3
Muut/selvittämättömät	37	-

Taulukko 7.3. Moottoriajoneuvopalojen syitä Kaliforniassa ja Nevadassa Yhdysvalloissa kaudella tammi-lokakuu 1980-luvun puolivälissä (Cole 1992, s. 101 - 102). Palojen kokonaislukumäärä oli 1448. Pyörityksien takia summa ei ole 100 %.

Palon syy	Osuus (%)
Tuntematon	54
Moottoritila (polttoaineeseen liittyvä)	22
Sähköinen	10
Tuhopoltto	3
Autotallipalo	3
Savuke/kytevä aine	1
Muut tunnistetut syyt	5

7.2 LIKKUVIEN AUTOJEN PALOT

On melko epätavallista, muttei mahdotonta, että liikkuva auto roihahtaa liekkeihin. Tähän vaikuttavat mm. seuraavat asiat:

- Sähköinen vika havaitaan useimmiten hajusta ja/tai savusta jo kytevä palon vaiheessa.

- Osa autosta pysyy viileänä ilmapvirtausten takia ja tämä saattaa pitää kuumien pintojen lämpötiloja syttymislämpötilojen alapuolella.
- Palavien nesteiden päästöt voivat laimentua ilmapvirtausten takia ennen kuin seos ylittää syttymisrajan.

Ajajan pysähtyttyä tarkistamaan mahdollisia vikaan viittaavia huomioita, syttyminen tai siirtyminen liekehtivään paloon on todennäköisempää. Jäähdyttävä ilmapvirta jää pois, mutta moottorin eri osat ovat vielä hyvin kuumia ja palavan nesteen vuoto saattaa sytyttää palon. Jos tulipalo on jo syttynyt liikkuvassa autossa, ilmapvirtaus voi kuitenkin levittää paloa hyvinkin nopeasti.

Moottorin tilan syttymislähteitä ovat mm. kipinät sähkö(sytytys)järjestelmästä, ylikuumentuneet sähköjohdot, oikosulut ja kuumat pinnat, erityisesti pakoputkisto sekä kolaritilanteissa kitkan aiheuttamat kipinät tai metalliosien hankautuminen. Syttyvä materiaali voi olla polttoaine, voiteluöljy, jarruneste, ohjaustehostimen neste, rasva ja siihen tarttunut pöly ja lika, kaapelien ja sähköjohtojen eristemateriaali (yleensä PVC-muovi) sekä lämpöeristeet. Uusissa autoissa muoviosia käytetään entistä enemmän. Joissakin autoissa varapyörä on moottorin tilassa.

Moottorin tilassa tulipalon aiheuttava vika voidaan huomata esim. seuraavasti:

- häiriöitä moottorin käynnissä vaillinaisen polttoainesyötön takia tai sähkövian aiheuttamaa epätasaista sytytystä.
- haju- tai savuhavainto, esim. polttoaineen haju tai palaneen sähköjohtoeristeen tai muun muovin haju.
- irrallisten osien aiheuttamat asiaankuulumattomat äänet.

Kitkasta johtuva ylikuumentuminen ja syttyminen voi mm. sattua renkaissa, laakereissa, akseleissa voimansiirrossa tai jarruissa.

Sähköisiä syitä esiintyy todennäköisemmin korjaus- ja muutostöiden, kolari- tai muiden vaurioiden jälkeen sekä uusissa autoissa asennusvirheiden seurauksena.

Jos palo on syttynyt matkustamossa, syy johtuu useimmiten joko siellä olleiden henkilöiden toiminnasta tai sähköisestä viasta. Tupakoinnista aiheutuneet palot havaitaan yleensä palo ehtimättä kehittyä kovinkaan pitkälle ja sammutetaan kytemisvaiheessa (vertaa taulukot 7.1 - 7.3). Palavaa ainetta matkustamossa ovat erilaiset pehmusteet, verhoukset ja muoviosat.

Jos paloa epäillään tahallisesti sytytetyksi ja väitetään auton olleen liikkeessä syttymishetkellä, tutkimuksessa tarkistetaan, onko auto voinut olla silloin ajokunnossa. Ellei auto ole ollut ajokuntoinen, se on siirretty palopaikalle hinaamalla, työntämällä tai nostamalla (lavalta). Etsitään tähän viittaavia jälkiä.

7.3 AUTOPALOT ONNETTOMUUSTILANTEISSA

Tilastollisesti osoittautuu, että tulipalo sattuu yllättävän harvoin onnettomuustapauksissa. Cooke ja Ide (1985) esittävät eri tutkimuksiin vedoten, että vain 0,22 ... 1,68 % tutkituista auto-onnettomuuksista johti tulipaloon. Taulukon 7.1 selvitetystä tapauksista 4 % liittyi kolariin. Luvut ovat alhaisia ottaen huomioon, että onnettomuudet usein johtavat polttoainevuotoihin ja sähköjärjestelmän vaurioihin. Taulukon 7.1 mukaan palo on syttynyt polttoainesäiliön lähellä 33 %:ssa kolaritapauksista, mutta vain 3 %:ssa kolariin liittymättömistä tapauksista.

Tietyissä onnettomuuksissa, kuten auton pyörähtäessä ympäri ja erityisesti jäädessä katto alaspäin, autot syttyivät todennäköisemmin kuin muunlaisissa onnettomuuksissa. Tällöin polttoainevuotoja esiintyy useammin kuin onnettomuuksissa, joissa auto pysyy pyörillään.

Tutkimuksissa arvioitiin että 56 % tunnistetuista polttoainevuodoista tuli polttoaineen täyttöputken ja korkin ympäristöstä (Cooke ja Ide 1985). Tutkimuksissa tarkasteltiin myös, onko auton syttyminen todennäköisempää, jos sen moottori on perässä ja polttoainesäiliö edessä. Kysymykseen saatiin kuitenkin ristiriitaisia tuloksia, eikä asiaan voitu ottaa kantaa puolesta eikä vastaan.

7.4 PYSÄHTYNEIDEN AUTOJEN PALOT JA NIIDEN TUTKIMINEN

7.4.1 Yleistä

Enemmistö autopaloista on sellaisia, että niiden voidaan olettaa syttyneen auton ollessa pysähtynyt. Tutkimuksissa voidaan saada tietoja auton omistajalta, palokunnalta, silminnäkijöiltä, palopaikan tutkimisesta, vertailusta samanlaiseen palamattomaan autoon sekä auton käyttö- ja huolto-ohjeista.

Omistajalta voidaan saada seuraavia tietoja:

- Milloin ja miten auto on viimeksi ollut käytössä
- Mihin auto jätettiin
- Olivatko ovet lukossa ja ikkunat suljettuina
- Olivatko auton avaimet tai arvoesineitä autossa, mitä kuului auton vakiovarustukseen, oliko autossa tulenarkoja aineita, jne.
- Oliko äsken esiintynyt vikoja, muutoksia tai vahinkoja
- Auton viimeaikaiset huollot ja korjaukset
- Milloin auto on viimeksi nähty vaurioitumattomana?

Jos auto syttyi ajon aikana selvitetään mm.

- Miten kauan oli ajettu, missä ja millä nopeudella
- Mikä oli henkilö- ja tavarakuorma
- Milloin oli viimeksi tankattu ja kuinka paljon
- Milloin ja mistä huomattiin hajua, savua tai liekkejä
- Minkälaisia häiriöitä havaittiin auton toiminnassa
- Miten kuljettaja reagoi havaintoihin ja millaisin seurauksin
- Miten palo yritettiin sammuttaa ja millaisin tuloksin
- Milloin palokunta saapui paikalle, kuka hälytti ja milloin
- Kauanko palo kesti ennen lopullista sammumista?

Silminnäkijältä kysytään

- Havaintoaika ja olosuhteet
- Olivatko ovet auki tai raollaan
- Oliko joku ikkunoista auki, avattuna tai rikottuna
- Palon koko ja sijainti
- Savun väri
- Oliko joku ollut lähellä autoa.

Sammutukseen osallistuneilta henkilöiltä kysytään samat asiat kuin muilta silminnäköijöiltä.

Autopalo kehittyi nopeasti edellyttäen että ilmanvaihto on riittävä. Siksi ensimmäisen silminnäköijän havainnot palon alkuvaiheista ovat tärkeitä. Palon kehittymisaste palokunnan saapumishetkellä on usein nähtävissä palon jälkeen, koska autopalot saadaan yleensä nopeasti sammutetuksi. Tuulen suunta ja voimakkuus vaikuttavat joskus huomattavasti palojälkeen, ja ne tulisi selvittää ennen tutkimuksen aloittamista.

Oppikirjan toisen osan kohdassa 4.2 esitetään VTT:ssä suoritettujen henkilöautojen palokokeiden tuloksia.

7.4.2 Auton tutkiminen

Auton tunnistus

Auton rekisterinumero, valmistusnumero, valmistaja, malli ja väri merkitään muistiin.

Tutkimusjärjestys

Auto tutkitaan ulkopuolelta mahdollisimman täydellisesti ennen sisäpuolen tutkimista. Auto valokuvataan sitä mukaa kun tutkimus edistyy (kuva 7.1). Havainnot merkitään muistiin ja täydennetään valokuvilla. Tutkimuksen kannalta tärkeät esineet ja osat merkitään ja otetaan talteen.

Palamisjäljet

Auto ja siinä olevat palamisjäljet valokuvataan ja täydennetään tarvittaessa piirroksilla.

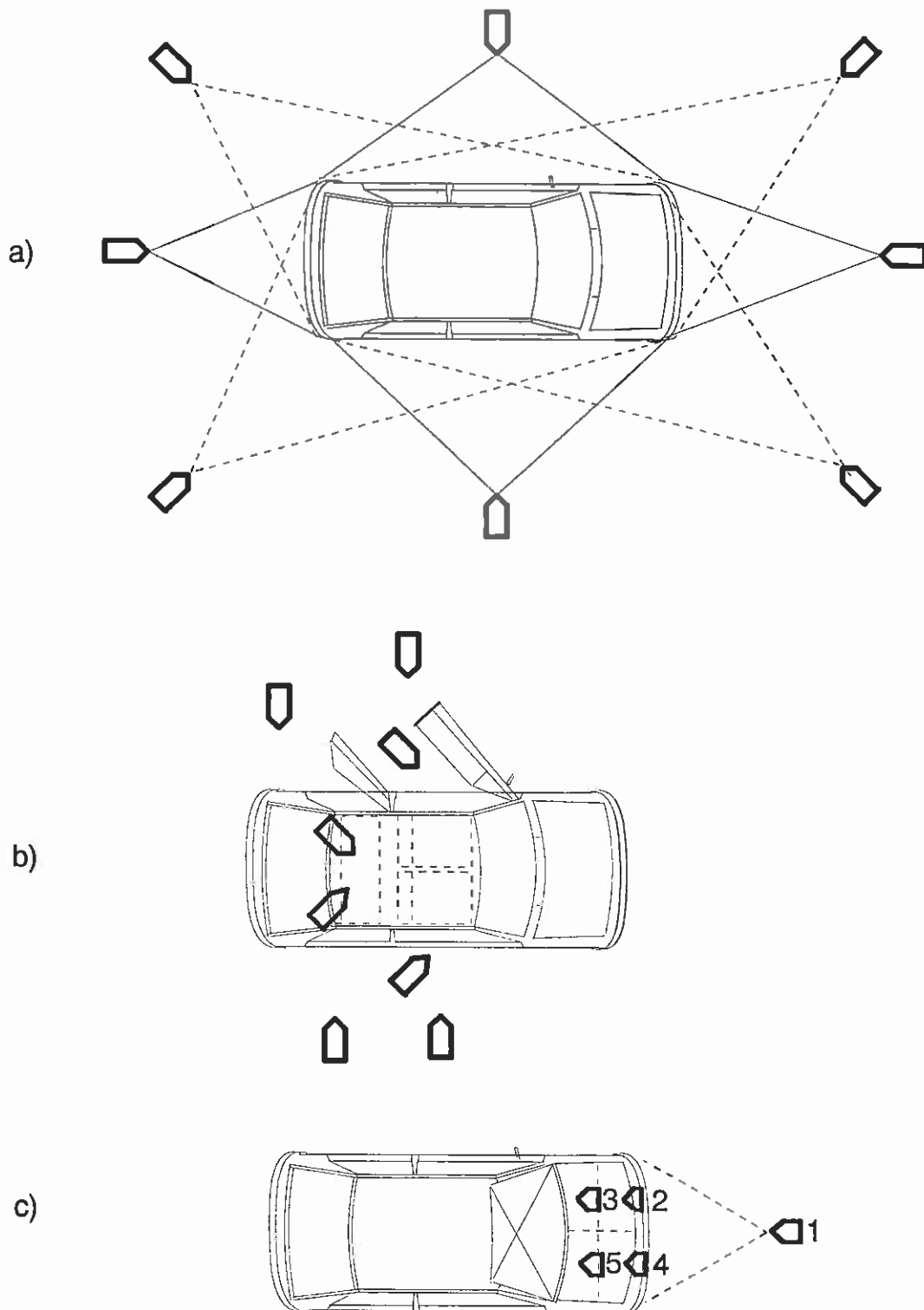
Palon syttymiskohta

Tutkimuksessa pyritään ensiksi selvittämään syttymiskohta ja siinä oleva materiaali, joka on voinut a) syttyä palamaan ja b) ylläpitää paloa.

Henkilöauto voidaan yleensä jakaa kolmeen osaan: moottoritila, matkustamo ja tavaratila. Tilastojen mukaan noin kaksi kolmasosaa autopaloista, jotka eivät liity kolareihin, on syttynyt moottoritilassa, yksi kolmasosa matkustamossa ja muiden paikkojen osuus tilastoissa on hyvin pieni. Usein voidaankin selvästi osoittaa, missä osassa palo on syttynyt. Jos palo on syttynyt matkustamossa, palon syttymiskohta voidaan usein rajoittaa noin neljäsosaan matkustamon pohjapinta-alasta erityisesti, jos palo on sammutettu ennen auton täyttä tuhoutumista.

Ulkopuolisen maalin palamisjäljet voivat antaa osoituksen syttymiskohdasta, mutta tuulen vaikutus ja hapen saanti tiiviin kotelon sisällä on otettava huomioon. Palon vaikutus maalattuun metalliin voidaan karkeasti luetella seuraavasti, siirryttäessä matalammista lämpötiloista korkeampiin:

- maalipinta on tummunut, hieman rypistynyt, mutta muuten ehjä
- maalipinta on kuplinut ja rakoillut
- maalipinta on mustunut, hiiltynyt ja hilseillyt
- maali on palanut ja jäljellä on tuhka tai paljas metalli.



Kuva 7.1. Auton yleisiä valokuvaussuuntia nuolilla merkittyinä: a) auton korin ulkopuoli, b) matkustamo ja c) moottoritila, yleiskuva moottoritilasta ja konepellin sisäpuolesta sekä neljä osakuvaa moottoritilasta. Yksityiskohtia valokuvataan lisää tarpeen mukaan.

Mitkä lämpötilat aiheuttavat minkintyyppisiä jälkiä, riippuu maalityypistä, maalin paksuudesta ja iästä. Vertailemalla jälkiä keskenään saadaan suhteellinen käsitys palon kuumista ja viileistä kohdista, mikä joskus voi olla suorassa yhteydessä palon alkamiskohtaan. Jos palokuormassa on selviä eroja ja palo on kehittynyt pitkälle, se vaikuttaa kuumien kohtien sijaintiin. Eroja palokuormassa voi olla erityisesti auton pituussuunnassa, joten maalin palamisjäljet voivat olla apuna vertaillaessa auton vasemman ja oikean puolen tapahtumia.

Ovien maalipintojen palamisjäljet antavat hyvän kuvan ovien asennosta palon aikana erityisesti oven oltua täysin auki, mutta usein myös sen oltua raollaan. Oven ylä- ja sivureunan jälkiä verrataan auton korissa oleviin jälkiin: jos eroja on, niin ne näkyvät yleensä selvästi.

Matkustamon sisustuksesta vapautuu yleensä riittävästi lämpöä lommahduttamaan auton kattopellin, joten painunut katto ei välttämättä ole osoitus paloa kiihdyttävien aineiden käytöstä. Painuma saattaa olla selvimmin näkyvissä syttymiskohdan yläpuolella, mutta tämä ei ole yleinen sääntö. Tuulen suunta ja hapen saanti voivat vaikuttaa enemmän kuin palon kuumin kohta.

Sulanut lasi tai metalli voi antaa vihjeitä palon kehittymisestä, mutta on muitakin mahdollisuuksia. Lasi voi rikkoontua ja pudota lattialle sulamatta palon aikaisessa vaiheessa ja sulanut lasi voi pysyä kehyksissä palon loppuvaiheisiin asti. Sulanut lasi ei osoita paloa kiihdyttävien aineiden käyttöä, koska auton normaali sisustus sulattaa lasin palaessaan. Tuulen vaikutus näkyy suurempana lämpörasituksena tuulen alapuolella, ja voi näkyä siten, että tuulen alla olleet ikkunat ovat sulaneet, mutta sen yläpuoliset eivät.

Sulaneiden metallikappaleiden vertailussa tulee muistaa, että komponenttien valmistajat käyttävät erilaisia metalliseoksia, joiden sulamislämpötilat voivat poiketa valmistajalta toiselle ja olla samankin auton samankaltaisissa komponenteissakin erilaisia.

Jos auto on sammutettu ennen sen täydellistä tuhoutumista, osa sisustuksesta on jäljellä ja sen perusteella voidaan rajata palon syttymiskohtaa. Auton lattiamattojen palamisastetta kannattaa selvittää, koska se riippuu yleensä siitä, kuinka lähellä syttymiskohtaa ne ovat olleet. Muovimattojen suojaava vaikutus on otettava huomioon. Lattialle mahdollisesti kaadettujen palavien nesteiden jälkiä tarkistetaan.

Auton alusta tutkitaan mahdollisuuksien mukaan. Tämä on ainoa tapa selvittää, onko auton alla ollut tulipalo. Alustan lämpöauriot voivat osoittaa palon kuumimman kohdan; tähän vaikuttaa mm. lattiamaton paksuus sekä kumimattojen lukumäärä ja paksuudet. Vuotava polttoaineputki voi aiheuttaa lammikkopalon auton alle. Auton alla syttyneet tulipalot voivat johtua katalysaattorin tai kitkan aiheuttamasta ylikuumenemisestä.

Useampi syttymiskohta

Jos auto on sytytetty tahallisesti, syttymiskohtia voi olla useampia joko onnistuneita tai epäonnistuneita. Nämä saattavat löytyä vaurioitumattomista osistakin joko auton sisä- tai ulkopuolelta. Palavaa nestettä on voitu kaataa auton päälle, moottoritilaan tai matkustamoon. Auton alapuolella on saattanut olla nuotio ja siitä on jäänyt jälkiä. Esimerkiksi jos moottoritilassa ja tavaratilassa on ollut palo, mutta matkustamo on säilynyt ehjänä, voidaan epäillä tahallista sytyttämistä.

Lukitus ja ilmanvaihto

Selvitetään, ovatko ovet olleet lukittuina vai eivät, samoin tavaratila. Etsitään mahdollisia murtautumisjälkiä. Tarkistetaan palokunnan toiminta, koska sammuttajat murtautuvat usein moottoritilaan ja tavaratilaan varmistaakseen sammuttamisen.

Ilmanvaihto on oleellinen asia palon kehittymiselle. Jos ovet ja ikkunat ovat kiinni, palo auton matkustamossa ei kehity kovinkaan pitkälle ennen kuin happi loppuu, auto täyttyy savusta ja palo joko sammuu itsestään tai palaa hitaasti, mahdollisesti kytien tuntejakin. Jos tässä vaiheessa ikkuna rikkoutuu, palo saattaa voimistua nopeasti. Vertaa oppikirjan toinen osa, kohta 4.2, autojen palokokeet.

Ikkunan sijainti voidaan päätellä nostomekanismin asennosta tai ikkunasirpaleiden sijainnista. Valtaosa ylhäällä olleen rikotun ikkunalasin sirpaleista löytyy auton lattialta ja vähäinen osa ovesta, kun taas alas lasketun ikkunan osat löytyvät ovesta.

Oven asento palon aikana voidaan päätellä palojäljistä kuten edellä on esitetty.

Auton osien tai irtaimiston siirtäminen tai vaihtaminen

Jos omistaja tai joku muu on sytyttänyt auton, on tavallista, että siitä on poistettu osia. Tällaisia ovat esim. radio, radioantenni, kasettisoitin, työkaluja, akku, laturi, käynnistysmoottori, varapyörä ja peili(t). Jos omistaja on sytyttänyt autonsa, niin esim. akku tai renkaat on mahdollisesti vaihdettu huonompiin. Jos renkaita on vaihdettu, niin ne ovat usein huomattavasti heikkolaatuisemmat ja jäljelle jäänyt kulutuspinna saattaa olla sileä. Vanteen ja maan väliin jää usein sen verran rengasta jäljelle että pinnan laatu käy ilmi. Renkaat ja/tai vanteet saattavat olla yhteensopimattomia keskenään tai eivät sovi autoon ollenkaan ja osa kiinnitysmuttereistakin voi puuttua.

Onnettomuudessa sattuneet vahingot

Jos auto on vahingoittunut onnettomuudessa, omistaja on saattanut sytyttää autonsa joko vakuutusrahojen takia tai peittääkseen jälkiä, jotka yhdistävät häntä onnettomuuteen. Kolaritapauksissa on auton etuosa usein vaurioitunut, kun taas autopaloissa etuosa usein säilyy verraten palamattomana. Selvitetään mahdollisia kolarijälkiä.

Matkustamo

Yleensä on mahdollista tunnistaa ja paikallistaa valtaosa auton varusteista ja siinä olleista esineistä myös silloin, kun auto on pahoin palanut. Tämä koskee erityisesti lattialta löydettyjä esineitä; paitsi palamattomia esineitä myös palavia kuten tulitikkuja, paperia ja muovia. Istuimien jousien kannattamina olleet esineet voivat tuhoutua lähes kokonaan. Jopa ihmisen ruumis voi tuhoutua hyvin pitkälle autopalossa, jos se on istuimen kannattamana ja ilmansaanti ruumiin eri puolille on riittävä.

Lattialta löydetyt jäännökset käydään huolellisesti läpi ja kirjataan. Selvitetään, mihin osiin tai varusteisiin ne liittyvät. Jos on mahdollista, verrataan samanlaiseen palamattomaan autoon. Erityisesti selvitetään virtalukko ja sen alapuolella oleva ympäristö sekä etsitään virta-avain tai sen jäännöksiä. Tarkistetaan virta-avaimen, erilaisten kytkimien sekä vipujen asennot.

Etsitään mahdollisten palavien nesteiden jättämiä lammikkopalon jälkiä lattiamatoista ja niitä sisältäneiden astioiden tai säiliöiden jäännöksiä. Moottoribensiinin höyry on 3 ... 4 kertaa ilmaa raskaampaa (SFS-käsikirja 39, 1986) ja jos sellaista on ollut matkustamossa, se saattaa kertyä auton alustassa oleviin koloihin. Tarvittaessa otetaan näytteitä palavien nesteiden määrittämistä varten (kohta 3.6.1).

Istuinlämmittimen vialliset kaapelit voivat sytyttää pehmusteet palamaan tai kytämään, jolloin liekehtivä palo voi syttyä viivästyneesti.

Vakuutuspetostapauksissa saatetaan ilmoittaa, että autossa on ollut arvokasta irtaimistoa kuten vaatteita tai matkapuhelimia. Vaatteista löytyy lähes aina ja matkapuhelimesta aina lattialta tunnistettavia osia, mikäli sellaisia tavaroita todella on ollut autossa.

Tavaratila

Autopalot sytyvät harvoin tavaratilasta (taulukot 7.1 - 7.3). Käydään läpi tavaratilassa olleet palojäännökset ja tarkistetaan, löytyykö sieltä auton normaaliin varustukseen kuuluvia välineitä kuten varoituskolmio, nosturi, varapyörä ja työkaluja. Tarkistetaan, millainen kuorma tavaratilassa on ollut.

Moottoritila

Selvitetään moottorin yleistila ja mahdolliset puuttuvat osat. Jos on aihetta epäillä moottorin tilaa, annetaan auton asentajan selvittää, onko se ollut käyttökunnossa ennen paloa. Jos moottori on sytytetty tai yritetty sytyttää tahallaan, siellä voi olla öljyyn tai bensiiniin kasteltua paperia tai rättejä ja tulitikkuja. Jos kysymyksessä on tekninen vika, syttymissyy saattaa olla sähköinen tai palavan nesteen syttyminen, vertaa kohta 7.2.

Tarkistetaan polttoainejärjestelmä koko matkalta polttoainekorkista moottoriin. Etsitään mahdollisia vuotokohtia, reikiä tai viallisia tiivisteitä säiliöstä, putkistosta, pumpuista, kaasutimesta ja suihkutusrjestelmästä. Polttoaineen

täyttöputki ja korkki ovat usein muovisia ja voivat tuhoutua kokonaan palossa, samoin polttoaineputken kumiliittimet. Korkin lukosta voi pudota tunnistettavia osia auton alle, sen runkoon tai polttoainesäiliöön.

Pieni reikä jarrunesteputkistossa voi aiheuttaa sumusuihkun, joka voi syttyä osuessaan riittävän kuumaan pintaan.

Kuumia pintoja ovat pakoputkisto, erityisesti pakosarja ja katalysaattori. Katalysaattorien komponentit toimivat noin 700 °C lämpötilassa, ja koko katalysaattori muodostaa auton alapuolelle kuuman pinnan.

Sähköjärjestelmä

Sähköjärjestelmä tutkitaan sekä moottoritilasta että matkustamosta. Etsitään merkkejä ylikuumenemisestä, oikosulusta tai löysistä liittimistä, vertaa kohta 5.3. Tarkistetaan ensin virtalukon asennoista sähköjärjestelmän kytkentäkaaviota käyttäen, mikä osa järjestelmästä on ollut jännitteinen oletetulla syttymishetkellä. Systemaattinen sähköjohtojen läpikäynti aloitetaan akusta seuraten jännitteisiä johtimia niiden eri kytkimiin. Tarkistetaan jokainen kytkin, ja päätellään, onko se ollut suljettu vai avoin syttymishetkellä. Näin käydään läpi kaikki johtimet ja etsitään niistä tai niiden lähellä olevista metallipinnoista mahdolliset syttymisestä kielivät jäljet. Jos palo näyttää saaneen alkunsa kytkentäkaavion mukaan jännitteettömästä johtimesta, on tutkittava, olisiko se voinut kulumisen, virheellisen korjauksen, jälkeensä tehdyn asennuksen tai muun vian vuoksi tulla jännitteiseksi ja siten aiheuttaa syttymisen. Johtimet on sidottu tiiviisiin nippuihin, joissa virta saattaa vikojen vuoksi kulkeutua eri reittejä, kuin alunperin on suunniteltu.

Auton ympäristön tutkiminen

Jos auto on hinattu tai työnnetty palopaikalle, tästä voi olla jälkiä ympäristössä. Jos auto on pysäköity ja jätetty vaihde päälle, niin moottori voi käynnistyä kun palon edetessä moottoritilaan ja auto saattaa liikkua eteen- tai taaksepäin jonkin matkaa. On otettava huomioon mahdollisuus, ettei auto ole alkuperäisellä syttymispaikalla tutkittaessa renkaiden jälkiä ja maassa olevia palamisjälkiä.

Jos epäillään tuhopolttoa, palaneen auton ympäristöstä etsitään mahdollisia palavia nesteitä sisältäneitä säiliöitä, tulentekovälineitä ym. Jos autosta on irrotettu osia, nämä saattavat olla piilotettuna lähiympäristössä.

7.5 KUORMA-AUTOT JA REKAT

Kuorma-autot ja rekat voivat henkilöautoja tavallisemmin syttyä palamaan ajon aikana. Syynä tähän saattaa olla suurempi käytettävissä oleva energia, kuorman ylikuumeneminen sekä ajoneuvon koko, mistä johtuen kuljettaja ei pysty seuraamaan tarkasti auton takaosien tapahtumia. Kitkasta johtuva yli-kuumeneminen saattaa tapahtua akselistossa, jarruissa tai renkaissa.

Rengaspaloja esiintyy useammin raskailla ajoneuvoilla kuin henkilöautoissa. Esimerkkinä voidaan mainita rengasparin toisen puoliskon tyhjeneminen, jolloin paino on kokonaan ehjällä renkaalla. Tämä lämpenee sekä ylimääräisen kuorman aiheuttamasta kitkasta että tyhjenneen renkaan hankauksesta. Ylikuumentunut rengas ei välttämättä syty palamaan liekillä ajoneuvon liikkeessä, koska ilmavirta jäähdyttää rengasta, mutta se voi syttyä heti pysähtymisen jälkeen.

Kuorman itsesyttymistä voi esiintyä tapauksissa, missä tuotteen valmistuksessa esiintyy korkeita lämpötiloja eikä tuotteiden anneta jäähtyä riittävästi ennen kuormausta. Jäähtyminen saattaa tapahtua turvallisesti pienissä erissä mutta rekkaa täytettäessä massa voi olla riittävä itsesyttymiseen (vertaa kohta 5.8 itsesytyminen).

Jos säiliöauto, jonka kuormana on palavaa nestettä, joutuu onnettomuuteen, huomattava syttymis- tai räjähdysvaara on olemassa.

Paikallaan olevien kuorma-autojen ja rekkojen palot tutkitaan seuraten samoja suuntaviivoja kuin henkilöautojen paloissa.

Eräs huomattava ero on pitkän matkan rekat, joissa kuljettaja yöpyy. Silloin tulevat esille mm. vuoteessa tupakoimisen ja nestekaasukäyttöisten keittolaitteiden riskit.

8. KAASUPALOT

8.1 YLEISTÄ KAASUISTA

Jos palavaa kaasua pääsee vuotamaan rakennukseen, niin syttyminen on hyvin todennäköistä. Kaasun syttyminen voi johtaa tulipaloon tai räjähdykseen, jonka jälkeen seuraa usein tulipalo. Räjähdykset käsitellään luvussa 9.

Palavan kaasun syttyminen johtaa usein tavallista voimakkaampaan paloon, nopeampaan palon kehittymiseen ja vaikeampaan sammutustyöhön, myös kaasujen mahdollisten myrkyllisten vaikutusten takia.

Taulukossa 8.1 esitetään tavallisimmat palavat kaasut ja niiden ominaisuuksia.

Asuinrakennuksissa näistä kaasuista yleisimpiä ovat *metaani*, joka on maakaasun pääkomponentti, sekä *propaani* ja/tai *butaani* nestekaasuna. Käyttötarkoitus on pääosin lämmitys sekä ruoanlaitto (kaasuliedet). Turvallisuussyistä neste- ja maakaasuun on sekoitettava selvästi erottuvaa hajusteainetta niin paljon, että kaasu voidaan aistia silloin, kun sen pitoisuus ilmassa on vähintään yksi viidesosa sen räjähdyskelpoisen pitoisuuden alarajasta. Nestekaasun käyttö on yleistä esimerkiksi vapaa-ajan asunnoissa, matkailuperävaunuissa ja veneissä.

Propaanin ja *butaanin* seoksia käytetään myös moottorien polttoaineena, erityisesti siellä missä vaaditaan hyvin alhaisia pakokaasupäästöjä kuten sisätilojen trukeissa. *Propaania*, *butaania* tai niiden seoksia käytetään myös aerosoleissa ponneaineena.

Hiilimonoksidia syntyy hiilipitoisten aineiden epätäydellisessä palamisessa käytännössä jokaisessa tulipalossa.

Asetyleenin suurin käyttöalue on kaasuhihtaus ja -leikkaus happikaasuun sekoitettuna. Teollisuuskaasuista asetyleenin ja hapen seoksella saadaan kuumin (noin 3100 °C) ja terävin liekki.

Vety on edellisistä poiketen alkuaine, kevyin kaikista kaasuista ja vuotaa muita kaasuja helpommin pienen molekyylikokonsa vuoksi. Se palaa lähes näkymättömällä, sinisellä liekillä, minkä takia vuotava vetykaasu saattaa palaa vaikkei liekkiä näy.

Hiilivedyt palavat keltaisella, usein nokisella liekillä.

Kaikkia taulukon 8.1 kaasuja käytetään lisäksi laajalti erilaisissa teollisuuden kemiallisissa prosesseissa sekä erikoissovelluksissa.

Edellisten kaasujen lisäksi paloriskeihin liittyy vielä *happi*, joka paineistettuna tai nesteytettynä voi vaikuttaa erittäin voimakkaasti palamiseen. Happi on ilmaa raskaampi (suhteellinen tiheys kaasuna 1,11 kaasumaiseen ilmaan ja nesteenä 1,15 nesteilmaan verrattuna). Ilman normaalin happipitoisuuden (20,95 til.-%) ylittävät happipitoisuudet vaikuttavat kiihdyttävästi lähes kaikkiin palamiseen liittyviin

tekijöihin palamislämpöä lukuunottamatta. Esimerkiksi itsesyttymislämpötilat ja minimisyttymisenergiat pienenevät, palavuusalue laajenee ja palamisnopeus kasvaa kun happipitoisuus kasvaa (Zabetakis 1965). Lähes jokainen palava aine on nestemäisessä hapessa isku- ja räjähdysherkkä johtuen erittäin nopeasta mahdollisesta palamisesta.

Taulukko 8.1. Palavien kaasujen ominaisuuksia (¹AGA Gashandbok 1982, ²Zalosh 1995). Kiehumislämpötila on ilmoitettu normaalipaineessa 101,3 kPa, tiheys ilmanpaineessa 100 kPa ja 15 °C lämpötilassa.

Kaasu	Kiehumislämpötila (°C) ¹	Suhteellinen tiheys (ilma = 1) ¹	Massayksikön tilavuus (m ³ /kg) ¹	Itsesyttymislämpötila (°C) ²	Syttymisrajat ilmassa (til. %) ²	Minimisyttymisenergia (mJ) ²
Asetyleeni C ₂ H ₂	-84	0,91	0,91	305	2,5 ... 100,0	0,02
n-Butaani C ₄ H ₁₀	-0,5	2,11	0,40	405	1,8 ... 8,4	0,25
Etaani C ₂ H ₆	-88,6	1,05	0,79	515	3,0 ... 12,4	0,24
Eteeni C ₂ H ₄	-103,7	0,97	0,85	490	2,7 ... 36,0	0,07
Hiilimonoksidi CO	-191,5	0,97	0,85	608 ¹	12,5 ... 74,0	
Metaani CH ₄	-161,5	0,55	1,49	540	5,0 ... 15,0	0,26
Propaani C ₃ H ₈	-42,1	1,55	0,53	450	2,1 ... 9,5	0,25
Vety H ₂	-252,8	0,07	11,90	400	4,0 ... 76,0	0,02

Palavien kaasujen ominaisuuksista ja niihin liittyvistä käsitteistä katso kohtia 2.2.1.1 ja 2.3. Kaasujen palamista käsitteleviä laajempia teoksia ovat Zabetakis (1965) perusteellinen monografia, Simmons (1995) katsaus sekä Lewisin ja von Elben (1961) klassinen laaja kirja.

8.2 KAASUPALOJEN SELVITTÄMINEN

8.2.1 Kaasun syttyminen

Niin kauan kun kaasu pysyy putkistossa, pitoisuus on ylemmän räjähdysrajan yläpuolella eikä syttymisvaaraa ole. Palon tai räjähdysmahdollisuus syntyy vasta, kun kaasu sekoittuu ilmaan, mikä voi tapahtua joko putkistossa olevan vuodon kautta tai kaasun käyttölaitteen kautta.

Kaasun sekoittuminen ilmaan ja syttyminen voi tapahtua pääasiallisesti kahdella tavalla, joista toinen yleensä johtaa räjähdykseen ja toinen tulipaloon:

a) Vuotokohdasta pääsee kaasua karkuun suurehkoja määriä ennen syttymistä. Tiheytensä mukaan (ks. taulukko 8.1) kaasu joko valuu alaspäin tai nousee ylöspäin ja muodostaa tietyn ajan kuluttua syttyvän seoksen. Mikäli huoneessa on riittävästi ilmavirtauksia, kaasu sekoittuu ilmaan eri korkeuksilla kaasun tiheydestä riippumatta. Aluksi syttymiskelpoinen seos on paikallinen, mutta vuotonopeuden ja -ajan mukaan se täyttää kasvavan osan käytettävästä tilasta. Pienikin minimisyttymisenergian ylittävä energia, kuten tulitikun raapaisu, staattinen tai sähkökatkaisijan kipinä riittää sytyttämään seoksen, ja yleensä seuraa räjähdys.

b) Kaasu syttyy heti vuotokohdan läheisyydessä, jossa on paikallisesti syttymiskelpoinen seos, ja vuotava kaasu palaa soihtumaisesti vuotokohdan lähellä. Palava kaasusoihtu voi sytyttää lähellä olevia muita palavia materiaaleja ja seurauksena on tulipalo. Soihtun pituus riippuu kaasuputkiston käyttöpaineesta ja vuotoreiän suuruudesta.

8.2.2 Putkistovuodot

Seuraavassa luetellaan tavallisimpia putkiston vuodon syitä:

1. Liitoskohdat:

- liitos on ollut heikko alusta asti
- liitos on heikentynyt ajan myötä
- kuluneet tai vialliset venttiilit tai säätimet.

2. Korroosio putkistossa, joka on puhkaissut putken seinämän.

3. Mekaaninen vaurio esimerkiksi tärinän tai laitteen varomattoman siirtämisen vuoksi.

4. Putkiston tahallinen vaurioittaminen

5. Kovan kuumuuden aiheuttamat vauriot. Esimerkiksi kotitaloudessa käytettävien kaasuputkistojen tiivistämiseen käytettyjen juotosten juotosaineen sulamis-

lämpötilan on oltava yli 540 °C (SFS 3683, 1984). Tämä lämpötila ylittyy yleensä tulipaloissa. Toisena esimerkkinä tulipaloissa vaurioituvista osista voidaan mainita nestekaasuletkut.

Tapauksissa 1 - 4 vuoto voi johtaa joko räjähdykseen tai paikallisen tulisoihdun muodostumiseen.

Tapauksessa 5 räjähdys on epätodennäköinen, koska liitoksen tai putkiston osan sulattava lämpötila on todennäköisesti myös kaasun itsesyttymislämpötilaa korkeampi (Taulukko 8.1), jolloin kaasu syttyy heti. Seurauksena on silloin paikallisen palokuorman lisääntyminen vuotokohdan lähellä, usein soihduntapaisena liekinä. Palava kaasu voi aiheuttaa suuremman tuhon vuotokohdan läheisyydessä kuin mitä tulipalo on saanut aikaan muualla, ja palamisjälki voidaan mahdollisesti tulkita väärin palon syytymiskohdaksi. Palojälki liittyy siis tällaisessa tapauksessa palon seurauksiin eikä palon syyhyn.

8.2.3 Käyttölaitteet

Mahdollisia käyttölaitteisiin liittyviä vaaratilanteita ovat:

1. Laite ylikuumenee säätö- ohjaus- tai valvontalaitteen vian vuoksi ja sytyttää lähellä olevaa palavaa materiaalia
2. Kaasua vuotaa palamatta ympäristöön käyttäjän huolimattomuuden, säätö-ohjaus- tai valvontalaitteen vian takia tai laitteen rakenteiden rikkoontumisen vuoksi. Vuodon seurauksena voi olla räjähdys tai tulipalo kuten kohdassa 8.2.1 on esitetty.
3. Laite on normaalikäytössä, mutta liian lähellä olevat palavat materiaalit ovat syttyneet palamaan ja aiheuttaneet tulipalon.

Tyypillisiä tapauksia ovat öljyjen, rasvojen tai paperi- tai kangaspyyhkeiden syttyminen kaasuliedellä. Ravintoloissa, joissa liedet ovat kovassa käytössä ja joissa ilmastointiputkien puhtaana pitäminen on jäänyt vähemmälle, esiintyy usein rasvapaloja. Niissä palo leviää liedestä rasvaisiin puhaltimiin ja ilmastointihormeihin.

Muita mahdollisuuksia ovat siirrettävät lämmityslaitteet, jotka ovat liian lähellä helposti syttyvää materiaalia, sekä peitetyt lämmityslaitteet.

8.2.4 Kaasupalon selvittäminen

Jos rakennuksessa on kaasulaitteita tai -putkisto, niin tarkistetaan kaikki käyttölaitteet, venttiilien ja kytkimien asennot, etsitään mahdollisia vuotokohtia ja tarvittaessa tehdään painekoe putkistossa vuotokohtien löytämiseksi. Tarkistuksessa käytetään hyväksi putkiston ja laitteiden teknisiä piirustuksia ja ohjeita.

Ainakin seuraaviin asioihin kannattaa kiinnittää huomiota:

- Mitä kaasua on käytetty, milloin, mihin tarkoitukseen ja kuinka paljon, mitkä ovat kaasumittareiden lukemat?
- Onko kulutus ollut epätavallisen suuri tai onko tapahtunut muutoksia kulutuksessa?
- Onko rakennuksessa suoritettu huoltotöitä ja milloin?
- Onko palaneessa huoneistossa tai naapurihuoneistoissa havaittu kaasun hajua?
- Kytkimien, venttiilien ja säätimien asennot
- Väärin asennetut tai säädetyt käyttölaitteet
- Väärin käytetyt käyttölaitteet
- Väärin sijoitetut käyttölaitteet
- Sopimattomassa ympäristössä (palavien nesteiden höyryt tai kaasut, pölyt) käytetyt laitteet
- Tahallisiin vaurioihin viittaavat seikat kuten esimerkiksi tuoreet työkalujäljet, irralliset tai puuttuvat käyttölaitteiden tai putkiston osat
- Vuototilan ilmanvaihto-olosuhteet ja mahdolliset ilmavirtaukset sekä niiden vaikutus kaasun sekoittumiseen ilmaan
- Putkiston käyttöpaine, vuotokohdan pinta-ala, mahdollisuuksien mukaan vuotonopeus, vuotoaika sekä tilassa olleiden kaasupitoisuuksien arviointi
- Palavan kaasun, erityisesti soihtuna palaneen kaasun, palojäljet. Niistä voidaan joissakin tapauksissa jäljittää syttymis- tai vuotokohta.

Jos putkiston tai laitteiden osia tutkitaan myöhemmin laboratoriossa, ne irrotetaan vasta valokuvaamisen ja kytkimien asentojen muistiinmerkitsemisen jälkeen.

Jos kaasulaite on ollut syttymisen syy, sen ympärillä on yleensä siihen viittaavia palojälkiä. On kuitenkin otettava huomioon tuhopolton mahdollisuus, missä on yritetty saada tuhopoltto näyttämään kaasupalolta. Tämän mahdollisuuden selvittämiseksi voidaan ottaa näytteitä kemiallista analyysia varten, tarkistaa kaasulaitteen tila, kytkimien ja säätimien asennot sekä palojälkien alkamis- korkeus. Jos laite on maakaasukäyttöinen ja palo on alkanut kaasusta, palamis- jälkien matalin kohta on yleensä kaasun vuotokohdan korkeudella, koska maakaasu on ilmaa kevyempää. Nestekaasun vuodosta kaasu on voinut valua lattian tasolle.

9. RÄJÄHDYKSET

9.1 YLEISTÄ

Käsite räjähdys on kirjallisuudessa määritelty jossain määrin eri tavalla lähestymistavan mukaan. Seuraava määritelmä (Cruice, 1986) tuo esiin räjähdysten perusasiat: räjähdys on *korkeapaineisen* kaasun *nopeaa* vapautumista ympäristöön. Nopea tarkoittaa, että vapautumisen tulee olla riittävän nopeaa, jotta korkeapaineiseen kaasuun sitoutunut energia hajaantuisi paineaaltoon. Korkeapaineinen tarkoittaa, että vapautumishetkellä kaasun paine on korkeampi kuin ympäristön. Tämä määritelmä on riippumaton korkeapaineisen kaasun syntymekanismista.

Räjähdys voi syntyä kaasua rajoittavan astian ylipaineistamisesta mekaanisesti (kuten ilmapallon repeäminen), mekaanisesti/kemiallisesti (kuten höyrykattilan räjähtäminen) tai kemiallisesta reaktiosta (kaasuseoksen palaminen). Jotkut räjähdykset johtuvat niin nopeasti etenevistä kemiallisista reaktioista, että korkeapaineinen kaasu muodostuu pelkän kaasumassan hitauden vaikutuksesta ilman ympäröivää rajoittavaa astiaa tai rakennetta. Räjähdyksessä syntynyt paineaalto tasoittuu laajeten etenemällä ympäristöön, jossa se aiheuttaa yleensä vaurioita ympäröiviin tai lähellä oleviin rakenteisiin ja/tai ihmisiin.

Räjähdykseen liittyy usein voimakas ääni, mutta ääni sellaisenaan ei ole oleellinen asia yllä olevassa määrittelyssä. Korkeapaineisen kaasun synty ja väkivaltainen laajeneminen ovat räjähdysten ensisijaiset tunnusmerkit. Räjähdys saattaa synnyttää tulipalon, mutta se ei ole välttämätöntä. Kääntäen, tulipalo voi olla myös räjähdysten syy.

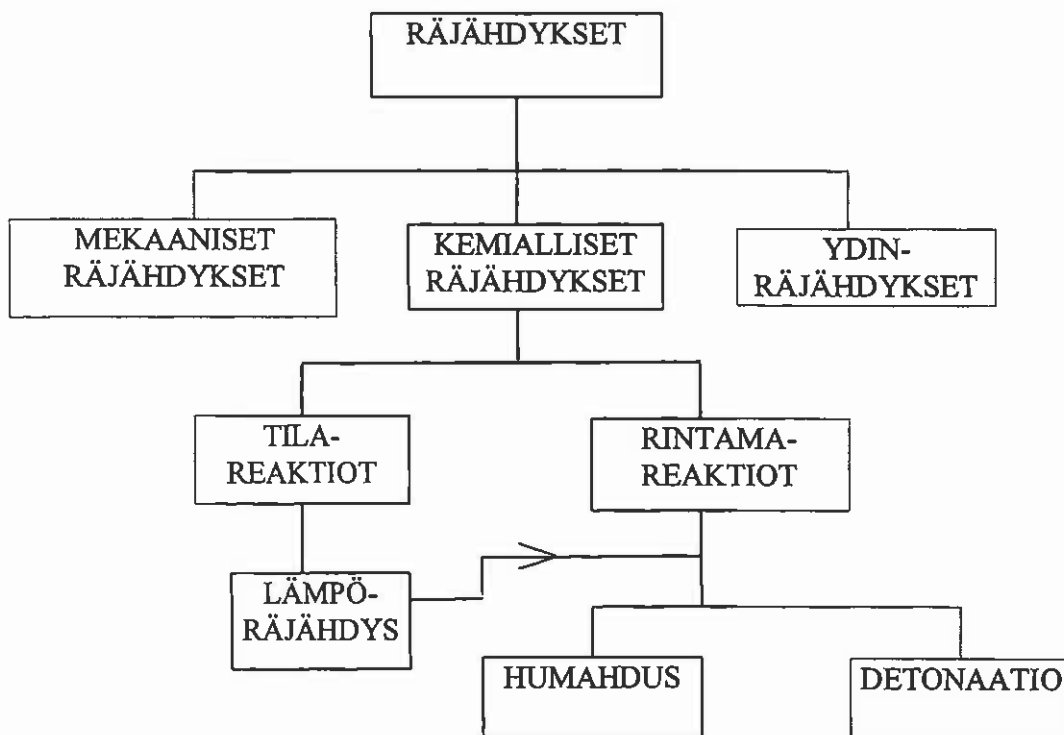
Räjähdykset voidaan jakaa kahteen pääluokkaan, mekaanisiin ja kemiallisiin. Nämä erotellaan toisistaan sen mekanismin mukaan, joka on aikaansaanut räjähtävän korkeapaineisen kaasun.

Mekaanisten ja kemiallisten räjähdysten lisäksi oman luokkansa muodostavat ydinräjähdykset, joissa korkea paine aiheutuu atomiydinten fuusiossa tai fissiossa vapautuneesta energiasta. Ydinräjähdys ei käsitellä tässä teoksessa.

Kaaviokuva eri räjähdysluokista esitetään kuvassa 9.1. Tilareaktiot tapahtuvat samanaikaisesti koko reagoivassa massassa. Niiden nopeus riippuu vain paikallisesta lämpötilasta ja reagoivien komponenttien pitoisuudesta. Reaktion edetessä ainemäärän sisällä voi syntyä suuriakin lämpötila- ja pitoisuuseroja. Tyypillinen tilareaktio on itsesyttyminen (kohta 5.8).

Rintamareaktion syttymiskohdassa syntyy lämpöä tuottavan reaktion seurauksena ohut, hyvin korkeassa lämpötilassa oleva reaktiovyöhyke, joka etenee reagoivassa aineessa syttymiskohdasta pois päin samanaikaisesti kaikkiin suuntiin. Kun reaktiovyöhyke on kulkenut polttoaineseoksen jonkin kohdan ohi, siinä ei juuri enää tapahdu kemiallisia reaktioita. Vyöhyke etenee läpi koko reagoivan polttoaineen, ellei sen kulkua ulkopuolisin keinoin keskeytetä. Tyypillinen

rintamareaktio on kaasuseoksen räjähdys, missä ilmaan on sekoittunut syttymisalueelle (vrt. kohta 2.2.1.1 ja 2.3.2) mahtuva pitoisuus palavaa kaasua.



Kuva 9.1. Kaaviokuva eri räjähdysluokista.

Räjähdyksistä on saatavissa erittäin paljon korkeatasoista teknistä kirjallisuutta. Tässä viitataan vain Zaloshin (1995) lyhyehköön ja Leesin käsikirjan (1980) jonkin verran laajempaan katsausartikkeliin sekä Bakerin ym. (1983) räjähdysten seurauksivaikutuksia käsittelevään laajaan monografiaan. Kaasuräjähdyksiä rakennuksissa Harris (1983) käsittelee helppotajuisella, käytännönläheisellä tavalla. Pölyräjähdysten osalta hyödyllisimpiä teoksia ovat oppikirjanomainen Nagyn ja Verakisin (1983) pölyräjähdysten fysiikkaan painottuva teos, pölyräjähdysten testaukseen ja torjuntatekniikkaan keskittyvä Bartknechtin (1980) monografia sekä uusin, Eckhoffin (1991) laaja käsikirja.

9.2 MEKAANISET RÄJÄHDYKSET

Mekaanisissa räjähdyksissä korkeapaineinen kaasu on syntynyt pelkästään fysikaalisten tapahtumien seurauksena. Räjähävien aineiden kemiallinen koostumus ei muutu prosessissa. Tällaisen räjähdysten hyvänä esimerkkinä on höyrykattilan repeäminen. Ylipaine syntyy veden lämmitessä ja höyrystyessä. Kun höyryn paine ylittää kattilan seinämien lujuuden, kattila repeää ja seurauksena on räjähdys. Tapahtumaan ei liity kemiallisia reaktioita tai palamista,

eikä veden tai sen höyryn kemiallisessa koostumuksessa (H₂O) tapahdu muutoksia.

Höyryräjähdys on mekaaninen, kiehuvan nesteen laajenevan höyryn räjähdys, josta englanninkielisessä kirjallisuudessa käytetään lyhennettä BLEVE (boiling liquid expanding vapor explosion). Tällainen räjähdys voi esiintyä, kun säiliön sisältämän nesteen lämpötila on korkeampi kuin sen nesteen kiehumislämpötila. Neste ei välttämättä ole palavaa. Höyryräjähdys syntyy useimmiten kun säiliössä olevan nesteen ja sen höyryn lämpötila nousee, esimerkiksi ulkoisesta lämmityksestä, niin korkeaksi, että höyrynpaine riittää rikkomaan nesteen säilytysastian. Paineistettu neste vapautuu ja höyrystyy hyvin nopeasti. Jos neste on palavaa, seurauksena on lähes aina tulipalo. Höyry voi syttyä alkuperäisestä ulkopuolisesta lämmöstä itsesyttymislämpötilan ylittyessä, paineaallon tai sirpaleiden aiheuttamasta sähkökipinästä tai kitkan aiheuttamasta paikallisesta kuumentumisesta. Höyryräjähdystä voi esiintyä kaikenkokoisissa säiliöissä aerosolipurkeista ja sytyttimistä säiliöautoihin ja teollisuuden varastosäiliöihin.

9.3 KEMIALLISET RÄJÄHDYKSET

9.3.1 Johdanto

Kemiallisissa räjähdyksissä korkeapaineinen kaasu syntyy kemiallisessa reaktiossa, missä räjähtävän aineen kemiallinen koostumus muuttuu. Kemialliset räjähdykset voidaan jakaa kahteen ryhmään: tila- ja rintamareaktiot.

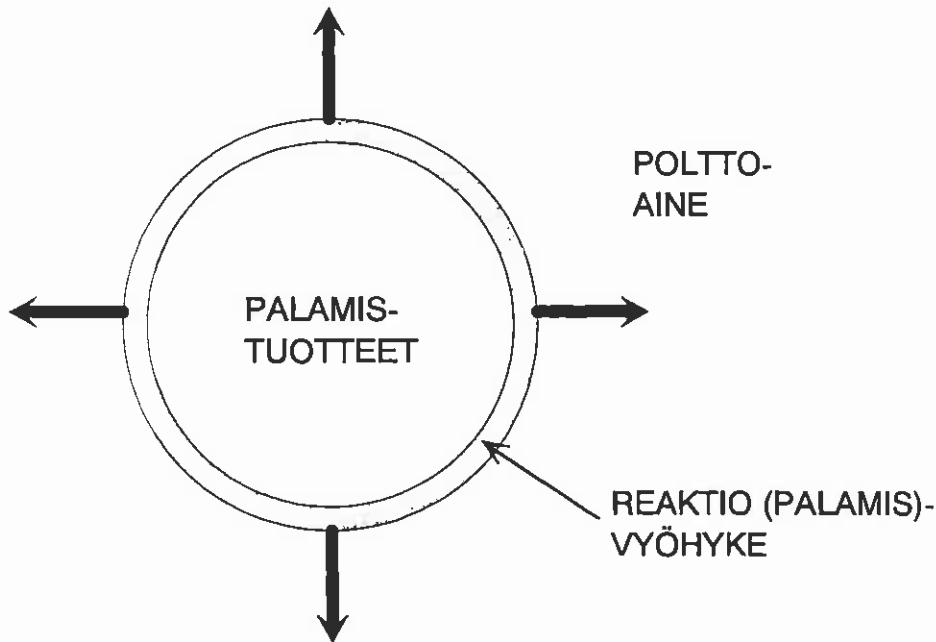
Tilareaktiot tapahtuvat koko polttoaineessa lähes samanaikaisesti. Reaktionopeus riippuu vain lämpötilasta ja reagoivien aineiden pitoisuuksista useimmiten Arrheniuksen yhtälön mukaisesti (vrt. 2.1.3). Lämpötilan noustessa energiaa vapauttava reaktio kiihtyy ja saattaa johtaa lopulta huomattavaan itselämpenemiseen tai jopa lämpöräjähdykseen. Koska lämpöä tuotetaan koko reagoivassa massassa, mutta lämpö poistuu vain tilan reunojen läpi, keskusta lämpenee enemmän ja siinä tapahtuvien reaktioiden nopeus kasvaa. Tämä jatkuu kunnes reagoiva aine on kulutettu loppuun tai aineen sisälle kehittyä niin paljon painetta, että massa hajoaa purkautumalla ja aine samalla jäähtyy keskeltä.

Tilareaktiot tuottavat yleensä kaasua niin hitaasti vapaassa ympäristössä, ettei korkeita paineita synny. Suljetussa tilassa tapahtuva reaktio voi nostaa painetta tuottamalla kaasua, höyrystämällä reagoivia tai muita aineita tai nostamalla säiliössä olevien kaasujen lämpötilaa. Jos reaktio tuottaa riittävän korkean paineen, säiliö repeää ja tapahtuu räjähdys.

Useimmat tilareaktiot, elleivät sammu energiahäviön takia alkuvaiheessa, muuttuvat rintamareaktioiksi.

Rintamareaktiossa on selkeä, etenevä reaktiovyöhyke, joka erottaa reagoimattoman aineen reaktiotuotteista. Useimmat kemialliset räjähdykset ovat luonteeltaan rintamareaktioita.

Tavallisimpia kemiallisia räjähdysreaktioita ovat kaasujen, höyryjen ja pölyjen reaktiot, missä *palamisreaktio* etenee polttoaine-happi(ilma)-seoksessa selvänä liekkirintamana, joka erottaa palaneen ja palamattoman polttoaineseoksen toisistaan (kuva 9.2 ja 2.15).



Kuva 9.2. Palamisreaktio etenee pallomaisesti polttoainetta ja palavaa kaasua sisältävässä vapaassa kaasupilvessä.

9.3.2 Yleistä palamisräjähdyksistä

Kohdassa 2.4 on kaasuräjähdyksen teoriaa käsitelty lyhyesti ja siitä saatujen yksinkertaisten mallien perusteella luokiteltu räjähdys periaatteellisesti erilaisiin tyyppisiin. Palonsyynselvityksissä nämä luokittelut ovat merkittäviä, koska räjähdysten seuraukset riippuvat huomattavasti räjähdysten tyypistä. Tavanomaisin räjähdystyyppi on *palamisräjähdys*, jossa polttoaine yhtyy ilmassa olevaan happeen. Palamisräjähdyksissä kaasun paine nousee polttoaineen palaessa ja syntyy nopeasti suuria määriä palamistuotteita ja kuumentuneita kaasuja. Nämä ovat myös palonsyynselvityksissä useimmiten esille tulevia räjähdysreaktioita.

Palamisräjähdys luokitellaan joko humahduksiksi tai detonaatioiksi, liekkirintaman etenemisnopeuden mukaan. Humahdus on palamisräjähdys, jossa liekkirintaman nopeus on pienempi kuin äänen nopeus reagoimattomassa polttoaineessa, ja detonaatio on räjähdys, jossa liekkirintaman nopeus on suurempi kuin äänen nopeus reagoimattomassa polttoaineessa. Humahduksessa paineen nousu ei ole läheskään niin raju kuin detonaatiossa ja paine nousee yhtenäisesti räjähdystilassa, koska paineaalto leviää äänen nopeudella. Detonaatiossa paine nousee erittäin nopeasti, liekkirintamaan syntyy äänen nopeudella leviävä iskuaalto, joten

paineen nousu on hyvin epäyhtenäistä räjähdystilassa. Räjähdyksessä syntyvän paineaallon yksityiskohtia on käsitelty Leesin (1980) kirjassa sivuilla 568 - 571 sekä laajemmin Bakerin ym. (1983) kirjassa alkaen sivulta 111.

Palamisräjähdykset voidaan jakaa ryhmiin tavallisimpien polttoaineiden mukaan seuraavasti:

- 1) palavat kaasut
- 2) palavien nesteiden höyryt
- 3) pölyt
- 4) pyrolyysituotteet sekä epätäydellisen palamisen palamistuotteet
- 5) humahtava räjähdysaine (low explosive, NFPA 921, 1995)
- 6) detonoiva räjähdysaine (high explosive, NFPA 921, 1995).

9.3.3 Palavat kaasut ja palavien nesteiden höyryt

Kaasumaiset polttoaine- tai ilmaseokset ovat herkimmin syttyviä ja voivat aiheuttaa räjähdysen. Itsesyttymislämpötilat 370 ... 590 °C ovat yleisiä. Pienimmät minimisyttymisenergiat ovat vedyllä 0,01 mJ ja asetyleenillä 0,02 mJ. Muiden hiilivetyjen minimisyttymisenergiat ovat noin 0,25 mJ. Rakennuksissa on siten yleensä usea mahdollinen kaasu- tai höyry-ilmaseoksen syttymislähde. Oikosulku sähkölaitteessa tai- verkossa tai kytkimen toiminta saattaa synnyttää kipinän, jonka energia on riittävä syttymiseen. Esimerkiksi sähkövalojen kytkeminen tai sähkölaite, joka kytkeytyy automaattisesti päälle ja pois, voi olla mahdollinen syttymissy. Avoimet liekit, kuten kaasulaitteiden sytytysliekit, tai tulitikon raapaisu ovat myös mahdollisia *syttymislähteitä*.

Kaasun tai höyryn tiheydellä saattaa olla selkeä yhteys rajoittavissa seinämissä oleviin räjähdysjälkiin (kärventyminen, maalin ym. kupliminen) erityisesti asuntoy- m. rakennuksissa. Ilmaa raskaammat kaasut ja höyryt, kuten palavien nesteiden höyryt ja nestekaasut, asettuvat normaalisti tilan alempiin osiin. Ilmaa kevyemmät kaasut, kuten maakaasu, pyrkivät nousemaan ja kerääntymään ylempiin osiin. Palamisjäljet ovat silloin selvemmat huoneen yläosassa esimerkiksi maakaasun tapauksessa ja puuttuvat tai ovat heikommat huoneen alaosassa. Ilmaa raskaamman kaasun räjähtäessä tilanne on päinvastainen. On kuitenkin muistettava, että räjähdysen jälkeinen palo voi sotkea tai tuhota kokonaan tämäntapaiset jäljet.

Maakaasuvuoto monikerroksisen rakennuksen ensimmäisessä kerroksessa saattaa johtaa räjähdysen, jonka keskus on ylemmässä kerroksessa. Ilmaa kevyempi maakaasu voi kulkea aukkojen kautta tai seinien sisällä ylöspäin.

Nestekaasuvuoto voi laskeutua alaspäin vuotokohdasta rakennuksen alempiin osiin ja kerääntyä yhteen kohtaan. Kaasu syttyy tällöin vain, jos pitoisuus on syttymisrajojen sisällä ja seoksessa on riittävä *syttymislähde*.

Täysimittaisissa kokeissa (Rabinkov 1988) on havaittu, että lähes samana pysyvät kaasupitoisuudet muodostuivat kaasuvuotokohdan ja a) katon väliin ilmaa kevyemmälle kaasulle (kokeissa metaani) tai b) lattian väliin ilmaa raskaammalle kaasulle (kokeissa nestekaasu), mikä osoittaa, että kaasun sekoittuminen vuotokohdan ja rajoittavan rakenteen välillä on voimakasta. Nestekaasuvuoto lattia-tasossa johti korkeampaan pitoisuuteen lattianrajassa ja pitoisuus laimeni hitaasti ylöspäin mentäessä. Samanlainen mutta käänteinen havainto tehtiin ilmaa kevyemmästä kaasusta, jonka vuotokohta oli katonrajassa. Ilmanvaihto, luonnollinen tai koneellinen, voi muuttaa kaasun liikkumista ja aiheuttaa sekoittumista.

Syttymissyiden etsinnässä voidaan toisinaan sulkea pois joitakin mahdollisuuksia tällaisen kerrostuman muodostumisen perusteella, kaasun mukaan joko vuotokohdan ala- tai yläpuolella. Räjähdyksikaasukerroksen ulkopuolella olevia *syttymislähteitä* voidaan silloin pitää melko epätodennäköisinä. Tämä edellyttää kuitenkin, että räjähdystilassa ei ole tapahtunut kaasujen sekoittumista esimerkiksi oven tai ikkunan avaamisen yhteydessä.

Kaasun tai höyryn tiheys ei välttämättä näy suoraan rakenteiden räjähdysvaurioiden suhteellisesta korkeudesta lattiasta, sillä paine leviää tilassa äänen nopeudella myös sinne, missä räjähtävää kaasuseosta ei ole. Esimerkiksi tietyn tilan seinien pullistumisesta tai rikkoutumisesta lattia- tai kattotasossa ei voida päätellä vuotokohdan sijaintia. Kaasuräjähdyksessä räjähdysvaurioiden sijainti huoneessa riippuu ensisijaisesti rakenteiden lujuudesta (tai oikeammin heikkoudesta). Vain detonaatoräjähdyksen vaikutukset ovat voimakkaimmat siellä, missä on ollut räjähtävää kaasuseosta.

Jos räjähdys johtuu nestemäisen polttoaineen höyryistä ja jos nestettä on kaatunut tai kaadettu huokoiseen lattiamateriaaliin, siinä havaitaan yleensä suuremmat palamisjäljet kuin ympäristössä. On tarkistettava, etteivät jäljet johdu pudonneista muista palavista esineistä tai rakennusosista, esimerkiksi katosta tai kalusteista sulanneesta muovista.

Maanalaisista jakeluverkoista vuotava maa- ja nestekaasu saattaa kulkea pitkiäkin matkoja maan alla putkikanavissa ja erilaisissa onkaloissa, tunkeutua rakennuksiin ja muodostaa räjähtäviä seoksia. Kaasu voi kulkeutua jopa maaperän läpi tai yleisimmin kaasuputkiston ulkopinnan läheisyydessä kanavistotunnelissa, viemäriputkistojen ja sähkö- tai puhelinjohtimien ympäristössä. Toisaalta kaasu saattaa myös laimentua ulkoilmaan aiheuttamatta vahinkoa. Pitkäaikaiset tihkuvat vuotokohdat saattavat olla paikallistettavissa kasvillisuuden muutosten perustella vuotokohdan läheltä.

Turvallisuussyistä neste- ja maakaasuun on sekoitettava selvästi erottuvaa hajusteainetta niin paljon, että kaasu voidaan aistia silloinkin, kun sen pitoisuus ilmassa on enintään yksi viidesosa sen räjähdyskelpoisen pitoisuuden alarajasta.

Mahdollisten hajusteiden tunnistaminen tulisi ottaa huomioon räjähdysten tutkimisessa. Vaikka paikalla olleet henkilöt eivät olisi tehneet hajuhavaintoja, kaasua on saattanut vuotaa tilaan. On mahdollista, että henkilön hajuaisti ei välttämättä olisi havainnut hajusteita tai että hajusteen teho olisi saattanut hävitä.

Kaasun tai höyryn kulkeutuminen ja kerääntyminen rakennuksen eri osiin voi johtaa useamman räjähdyskäs sarjaan. Kaasu- tai höyrykertymissä eri puolella rakennusta saattaa olla erilaisia ilma-polttoainesuhteita. Yhdessä kohdassa saattaa olla räjähtävä seos ja sen läheisyydessä on ylempään räjähdysrajan yläpuolella oleva seos. Ensimmäisen seoksen räjähtämisen seurauksena voi silloin toisen kohdan seos sekoittua ilmaan, jolloin siitäkin tulee räjähtävää, ja seurauksena on toinen räjähdys. Räjähdyskäs saattavat seurata toisiaan niin nopeasti peräkkäin, että henkilö havaitsee ne yhtenä räjähdyskäsna vaikka räjähdysjäljet osoittaisivat, että kysymyksessä on ollut useampi kuin yksi räjähdys. Esimerkki 25-kerroksisessa liikerakennuksessa tapahtuneesta maakaasuräjähdyskässtä (New York City huhtikuu 1974), jossa kaasua levisi hissikuiluissa, on esitetty Bakerin ym. (1983) kirjan sivulla 191.

Useimmat kaasua tai höyryräjähdyskäs ovat alemman luokan räjähdyskäsia (katso kohta 9.4.1), erityisesti nestekaasut ja palavien nesteiden höyryt. Ilmaa kevyemmät kaasut, kuten maakaasu, saattavat aiheuttaa ylempään luokan räjähdyskäsia.

Jos seoksen pitoisuus on lähellä räjähdysrajoja, vauriot ovat yleensä pieniä ja räjähdys kuuluu alempaan luokkaan, koska polttoaineen epätäydellisestä palamisesta seuraa lievä energian vapautuminen ja verraten alhaisia räjähdyspaineita. Jos seos on alemman räjähdysrajan lähellä, niin räjähdyskäs jälkeisiä paloja esiintyy harvemmin, koska polttoaine kuuluu jo räjähdyskäsissä yleensä kokonaan. Ylempään räjähdysrajan lähellä olevien seoksien räjähdyskäs sen sijaan usein aiheuttavat räjähdyskäs jälkeisiä paloja, jäljelle jääneen polttoaineen viivästyneen palamisen takia. Jäljelle jäänyt polttoaine saattaa palaa vasta, kun se on sekoittunut ilmaan räjähdyskäs negatiivisen painefaasin aikana (Lees 1980).

Jos kaasumaisen polttoaineen räjähdys kuuluu ylempään luokkaan, seos on lähes aina ollut lähes stoikiometrinen tai hieman sitä rikkaampi. Tällainen optimaalinen seos tuottaa tehokkaimman palamisen, suurimman palamisnopeuden, paineenousunopeuden ja paineen sekä vastaavasti suurimmat vahingot. Polttoaine palaa yleensä loppuun ensimmäisessä räjähdyskäsissä.

9.3.4 Pölyt

Pölyräjähdyskäs teoriasta hyvän yleisesityksen antaa Nagyn ja Verakisin (1983) teos. Bartknechtin (1980) kirja ja sen myöhempi englanninkielinen täydennetty laitos ovat klassikkoja pölyräjähdyskäs testausmenetelmien kehittämisen kuvauksessa. Eckhoffin (1991) teos on laajin yhtenäinen esitys pölyräjähdyskäs koko kentästä ja mainio johdatus alan erikoiskirjallisuuteen 80-luvun loppuun saakka. Suomenkielisestä pölyräjähdyskäsia käsittelevästä kirjallisuudesta yhtenäisimmän yleiskuvan soveltavalta kannalta saa räjähdysvaarallisten aineiden lautakunnan toimittamasta turvallisuusohjeesta "Räjähdysvaaralliset pölyt" (SFS-

käsikirja 60, 1984), joka yli kymmenen vuotta vanhana on edelleenkin hyvin ajan tasalla. Pölyräjähdykset voivat aiheuttaa suuria vahinkoja teollisuuslaitoksissa. Eckhoffin (1991) käsikirjan sivuilla 159 - 202 on tiivistettyjä kuvauksia pahimmista sattuneista pölyräjähdysonnettomuuksista. Keski-Rahkonen (1994) on laatinut lyhyen suomenkielisen esityksen pölyräjähdysten fysikaalisista ilmiöistä.

Pölyräjähdys vai sattua, kun hienojakoinen palava aine leviää pölypilvenä sekoittuen sopivaan määrään happea, jos samalla tilassa on energialtaan riittävä *syttymislähde*. Pölyräjähdyksiä aiheuttavia aineita ovat kaikki hapettumattomat hienojakoiset aineet kuten

- luonnolliset orgaaniset aineet, esim. puu, vilja, sokeri, pellava
- synteettiset orgaaniset materiaalit, esim. muovit, väriaineet
- hiili ja turve
- kaikki metallit, esim. alumiini, magnesium, sinkki, rauta.

Sen lisäksi, että pöly on palavaa ja voi muodostaa pölypilven, seuraavat tekijät vaikuttavat pölyräjähdysten syntyyn:

a) *Hiukkaskoko*. Kun palava aine pilkotaan pienempiin osiin, palamisnopeus kasvaa koska sen pinta-ala kasvaa. Samalla aine syttyy helpommin. Otetaan esimerkiksi kuutionmuotoinen 1 litran puukappale. Sen pinta-ala on $0,06 \text{ m}^2$. Jos se leikataan 1 mm:n kuutioiksi, kokonaispinta-alaksi tulee 6 m^2 . Jos pilkkomista jatketaan edelleen $10 \mu\text{m}$:n suuruisiin kuutioihin, kokonaispinta-alaksi tulee 600 m^2 . Siten on ymmärrettävää, miten hitaasti palava puukalikka palaa lastuina nopeasti ja pölynä ($10\,000$ -kertainen pinta-ala) räjähtäen.

Jos pölyn hiukkaskoko on $100 \mu\text{m}$ tai sitä pienempi ja hiukkaset muodostavat pölypilven, niin palaminen on erittäin nopeaa ja puhutaan pölyräjähdyksestä. Yleisenä sääntönä voidaan pitää, että palava aine on sitä palo- ja räjähdysvaarallisempaa mitä pienempi sen hiukkaskoko on. Räjähdysten maksimipaine ja maksimipaineennousunopeus kasvavat kun hiukkaskoko pienenee. Minimisyttymisenergia ja alin räjähdyskykyinen pölypitoisuus pienenevät myös hiukkaskoon pienentyessä, tiettyyn raja-arvoon asti. Yleensä katsotaan, että jos hiukkaskoko on suurempi kuin $0,5 \text{ mm}$ ($500 \mu\text{m}$) niin pölyräjähdys on epätodennäköinen.

Pölyräjähdysten maksimipaineennousunopeus riippuu suoraviivaisesti pölyn ominaispinta-alasta, millä tarkoitetaan pölyhiukkasen keskimääräistä pinta-alaa jaettuna hiukkasen massalla. Pölyn ominaispinta-ala on kääntäen verrannollinen hiukkasten läpimittaan.

Käytännössä teollisuusprosessien pölyhiukkaset ovat erikokoisia. Kohteesta kerätty pöly muodostaa jatkuvan kokojakauman. Jos mukana on suurempia hiukkasia niin räjähdysvaara yleensä pienenee, koska ominaispinta-ala pienenee. Keskimääräisesti karkeastakin pölystä voi kuitenkin erkautua hienoin jae, joka muodostaa pölyräjähdysvaaran.

b) *Pölypitoisuus*. Kuten kaasuilla, ilmaan sekoitetuilla pölypilvillä on ylempi ja alempi syttymisraja. Pölyillä nämä rajat eivät kuitenkaan ole yhtä hyvin määritellyt kuin kaasuilla, joiden palaminen tapahtuu homogeenisissa kaasupilvissä. Pölyillä ylempi räjähdysraja on vaikeasti määritettävissä, koska yhtenäisen pölypitoisuuden aikaansaaminen on vaikeaa. Alin räjähdyskykyinen pölypitoisuus on helpompi määrittää. Tämä riippuu jossain määrin hiukkaskoosta. Useimmilla pölyillä on alin räjähdyskykyinen pölypitoisuus alueella 10 ... 100 g/m³ ja ylin karkeasti alueella 2 ... 10 kg/m³.

Alemman ja ylempään räjähdysrajan välissä on räjähdysalue, jossa räjähdysten eteneminen on mahdollista. Maksimipaine ja maksimipaineennousunopeus vaihtelevat pölypitoisuuden mukaan. Voimakkaimmat pölyräjähdykset tapahtuvat stoikiometrisen pitoisuuden yläpuolella, koska osa pölystä jää yleensä palamatta. Kuten edellä mainittiin, niin käytännössä pölypilvet eivät ole tasalaatuisia ja vaikka keskimääräinen pölypitoisuus olisi räjähdysrajojen ulkopuolella, niin pölypilvessä saattaa esiintyä paikallisesti räjähtäviä pitoisuuksia.

c) *Syttyminen*. Jotta räjähdys ehdot täyttävä pölypilvi syttyisi, tarvitaan *syttymislähde*, jonka energia riittää käynnistämään palamisreaktiot ja ylläpitämään niitä kunnes itseään ylläpitävä palamisvyöhyke ts. syttymisalue on muodostunut. Tämä tapahtuu yleensä kohottamalla pöly-ilmaseoksen lämpötilaa tai purkamalla paikallisesti voimakkaasti energiaa, joka kohottaa pölyn ja sitä ympäröivän ilman adiabaattiseen liekin lämpötilaan. Tämä syttymiseen tarvittava minimienergia vaihtelee pölylaadun, hiukkaskoon ja pilven homogeenisuuden mukaan.

Eri pölypilvien minimisyttymislämpötilat vaihtelevat tyypillisesti 400 °C:sta yli 900 °C:seen (Field 1982). Jotkut pyroforiset pölyt voivat syttyä huoneenlämmössäkin (vrt. kohta 5.9). Monet pölyt syttyvät sähkökipinöistä, joiden energia on alueella 1 ...10 mJ, eli lähes yhtä pienestä *syttymisenergiasta* kuin tyypillisesti kaasuilla ja höyryillä.

d) *Turbulenssi (pyörteisyyys)* Teollisuusprosesseissa esiintyy melkein aina pyörteisyyttä erityisesti pneumaattisessa kuljetuksessa. Kasvanut turbulenssi johtaa jonkin verran suurempaan maksimipaineeseen, mutta lisää maksimipaineennousunopeutta moninkertaiseksi.

e) *Kosteus* Kosteus pienentää räjähdysvaaraa kahdesta syystä. Kosteamman pölyn hiukkaset tarttuvat helpommin toisiinsa, jolloin hiukkaskoko kasvaa ja pöly on vaikeammin sytytettävissä. Kosteamman pölyn veden höyrystyminen sitoo aluksi pölypilveen tuodun energian, joka ei sitten ole käytettävissä palamisprosessissa.

Pölyräjähdykset esiintyvät usein perättäisinä räjähdysten sarjoina, jolloin ensimmäinen räjähdys nostattaa lisää pölyä ilmaan. Uusi pölypilvi voi syttyä joko alkuperäisestä *syttymislähteestä* tai ensimmäisen räjähdysten palamistuotteista. Painevaikutusten lisäksi pölyräjähdysten tai räjähdysjärjestelmien liekit voivat myös sytyttää tulipalon tai paloja kaukana ensimmäisestä räjähdyksestä.

9.3.5 Pyrolyysituotteet ja epätäydellisen palamisen palamistuotteet

Suljetuissa tiloissa, joissa hapensaanti ei ole riittävää, aine palaa epätäydellisesti ja siellä muodostuu runsaasti hiilimonoksidia (häkää). Palo voi jopa lähes tukahtua, mutta pyrolyysi aineessa jatkuu silti vielä merkittävällä nopeudella. Tällöin tilaan muodostuu hiilimonoksidista ja muista pyrolyysituotteista ylempää syttymisrajaa rikkaampi seos, joka ei enää pala. Jos tällaiseen tilaan virtaa yhtäkkiä uutta ilmaa ja sekoittuu tilassa oleviin kaasuihin, ne laimentuvat ja seos voi muuttua palavaksi ja syttyä palamaan humahduksena, palokaasuräjähdyksenä. Tällainen tilanne voi esiintyä esimerkiksi ovea tai ikkunaa avattaessa. Palokaasuräjähdyksessä syntyvät paineet eivät ole korkeita (luokkaa 10 kPa), mutta liekkirintama etenee huonetilan yläosassa tyypillisesti nopeudella, joka on suurempi kuin 1 m/s. Siksi se voi olla vaarallinen esimerkiksi sammutushenkilöstölle, joka menee palavaan rakennukseen ja aukoo siellä ovia. Suomessa viimeksi yksi palomies menehtyi avatessaan Järvenpäässä 30.7. 1988 palaneessa huoneistossa vaatehuoneen oven, jonka sisälle oli kertynyt palon aikana pyrolyysikaasuja. Ovesta tunkeutunut pistoliekki poltti palomiehen kasvosuojuksen ja kypärän niin, että hän menehtyi palovammoihin (Katajamäki 1989).

9.3.6 Räjähdyksineet

9.3.6.1 YLEISTÄ

Standardi SFS 5347 (1987) määrittelee räjähdysaineet, pyrotekniset aineet ja räjähdystarvikkeet seuraavasti:

Räjähdyksineella tarkoitetaan jähmeää tai nestemäistä ainetta tai ainesosta, joka sellaisenaan kemiallisesti reagoimalla kykenee muodostamaan kaasua, jonka lämpötila, paine ja muodostumisnopeus ovat sellaisia, että niistä aiheutuu vahinkoa aineen ympärillä. Räjähdyksineeksi katsotaan myös pyrotekniset aineet, vaikkei niistä kehittyisikään kaasuja. Räjähdyksineeksi ei katsota ainetta, joka voi muodostaa ilman kanssa räjähtävän kaasu-, höyry- tai pölyseoksen, ellei se sellaisenaan ole räjähdysainetta.

Pyroteknisellä aineella tarkoitetaan ainetta tai ainesosta, joka on tarkoitettu tuottamaan itsestään etenevien eksotermisten kemiallisten reaktioiden seurauksena lämpöä, valoa, kaasua, savua tai näiden yhdistelmiä. Ilmiön aiheuttajana ei kuitenkaan ole detonaatio.

Räjähdyksitarvikkeella tarkoitetaan räjähdysainetta ja räjähdysainetta sisältävää esinettä tai välinettä. Räjähdyksitarvikkeeksi ei katsota sellaista esinettä tai välinettä, joka sisältää niin pieniä määriä räjähdysainetta, että aineen syttyessä esineen tai välineen ulkopuolelle ei aiheudu sirpaleita, liekkiä, savua, kuumuutta tai voimakasta ääntä. Räjähdyksitarvikkeeksi katsotaan myös muut aineet ja tarvikkeet, jotka on valmistettu tuottamaan räjähdysten tai pyroteknisen ilmiön.

Räjähdystarvikkeet jaetaan standardissa SFS 5347 (1987) viiteen vaarallisuusluokkaan. Luokitukseen vaikuttaa, kuinka suuren vaaran räjähdde voi aiheuttaa mahdollisessa onnettomuustilanteessa.

Vaarallisuusluokkaan 1.1 kuuluvat massaräjähdyksivaaralliset räjähdystarvikkeet. Näitä sisältävät räjähdde-erät räjähtävät kokonaan tai suurimmalta osaltaan, jos yksi räjähdde tai osa räjähdde-erästä räjähtää (esim. louhinta- ja sotilasräjähdysaineet, miinat ja eräät kranaatit).

Vaarallisuusluokkaan 1.2 kuuluvat sirpalevaaraa aiheuttavat räjähdystarvikkeet, jotka eivät kuitenkaan ole massaräjähdyksivaarallisia (esim. käsikranaatit).

Vaarallisuusluokkaan 1.3 kuuluvat palovaaralliset räjähdystarvikkeet, joista aiheutuu vähäistä räjähdys- ja/tai sirpalevaaraa. Ne eivät myöskään ole massaräjähdyksivaarallisia (esim. eräät pyrotekniset valmisteet, ohjusten ja rakettien ajopanakset).

Vaarallisuusluokkaan 1.4 kuuluvat räjähdystarvikkeet, jotka syttyessään aiheuttavat ainoastaan vähäistä vaaraa (esim. ilotulitusvälineet, aikatulilanka ja työkaluissa käytettävät patruunat).

Vaarallisuusluokkaan 1.5 erittäin epäherkät massaräjähdyksivaaralliset räjähdysaineet (veteen lietetyt räjähdysaineet).

Räjähdysaineiden, yhdisteiden tai seoksien, palamis- ja hajoamisnopeuden tulee olla suuri ja samalla vapautuvan energiamäärän runsas. Teknisesti käytettävältä räjähdysaineelta vaaditaan tehokkuuden lisäksi myös käsittelyvarmuutta, kemiallista ja fysikaalista muuttumattomuutta, riittävää syttymisherkkyyttä ja räjähdysvarmuutta, syttyneiden räjähdyskaasujen vaarattomuutta ja fysiologista vaarattomuutta. Omatekoisten räjähdysaineiden ominaisuudet voivat olla ennalta arvaamattomat. Johansson ja Persson (1970) ovat kirjassaan käsitelleet detonoivien räjähdysaineiden fysikaalisia ja kemiallisia prosesseja.

9.3.6.2 ALOITERÄJÄHDYSAINHEET

Aloiteräjähdyksaineet ovat herkkiä liekille, lämmölle, hankaukselle ja iskuille. Niitä käytetään ruutien ja räjähdysaineiden sytytykseen tarkoitetuissa nalleissa. Aloiteräjähdyksaineiden räjähdysteho on huomattavasti pienempi kuin varsinaisten räjähdysaineiden, mutta toisaalta niiden syttymisherkkyys on parempi. Ne saadaan syttymään pienellä *syttymisenergialla* esimerkiksi sähkönsallin sytytyskelmen hehkusta, tulilangan liekistä tai iskurin iskusta. Aloiteräjähdyksaineessa syttymisen jälkeen tapahtuva detonaatio aiheuttaa varsinaisen räjähdysaineen räjähtämisen.

Yleisesti käytettyjä aloiteräjähdyksaineita ovat lyijytrisinaatti, tetratseeni ja lyijyatsidi. Syttymisherkkin on lyijytrisinaatti. Tetratseeni on taasen iskuherkin. Lyijyatsidi syttyy melko huonosti.

9.3.6.3 LOUHINTARÄJÄHDYSAINHEET

Kaupallisesti saatavia louhintaräjähdyksaineita voidaan käyttää mm. rakennustoimintaan, kivien, mineraalien ja malmin irrotukseen ja jään rikkomiseen. Suomessa käytettävät louhintaräjähdyksaineet jaetaan yleensä dynamiitteihin ja varmuusräjähdyksaineisiin. Dynamiitit sisältävät pääasiallisesti nitroselluloosalla hyytelöityä räjähdysöljyä. Varmuusräjähdyksaineiden pääkomponenttina on ammoniumnitraatti.

Dynamiitti

Dynamiitti on räjähdysöljypohjainen louhinta- ja raivaustöissä yleisesti käytetty louhintaräjähdyksaine. Yleensä dynamiitti sisältää nitroselluloosalla hyytelöityä räjähdysöljyä, dinitrotolueenia, ammoniumnitraattia, natriumnitraattia, puujauhoa ja muita lisäaineita. Vedenkestävyytensä ansiosta dynamiittia voidaan käyttää myös vedenalaisiin räjäytyksiin. Tehokkuutensa vuoksi se sopii pohjapanokseksi avo- ja tunnelilouhinnassa.

Dynamiitti saattaa pilaantua säilytettäessä sitä yli vuoden valmistuksesta. Käyttökelvottomiin patruunoihin ilmestyy valkoisia läikkiä, ne turpoavat ja vuotavat tai niistä lähtee pistävä haju.

SUOMESSA VALMISTETTAVIA LOUHINTARÄJÄHDYSAINEEITA (1994)

Vihtavuori Oy

STONEX	kellertävä räjähdysöljyä sisältävä yleisräjähdysaine päällys vahattu paperi, muovipussi
SILLOSEX	jauhemainen, sisältää räjähdysöljyä ja ammoniumnitraattia päällys vahattu paperi, muovipussi
SILLOSEX 10	sisältää räjähdysöljyä ja ammoniumnitraattia päällys vahattu paperi

Forcit Oy

F-DYNAMIITTI	kellertävä räjähdysöljyä sisältävä muovaittava yleisräjähdysaine päällys vahattu paperi, muovipussi
A-DYNAMIITTI	kellertävä, muovaittava, sopii vedenlaiseen louhintaa päällys vahattu paperi
F-PUTKIPANOS	jauhemainen sisältää räjähdysöljyä ja piimaata päällys muoviputki
K-PUTKIPANOS	jauhemainen, sisältää räjähdysöljyä ja piimaata päällys muoviputki

PENDEX	sinivihreä muovailtava aloitepanos, sisältää erikoisdynamiittia ja pentriittiä päällys muovipussi
PX-PUTKI	sisältää Pendexiä päällys muoviputki
KIVEX	pintapanos, suuri räjähdysnopeus, sopii isojen kivien rikkomiseen

Varmusräjähdysaineet

Varmusräjähdysaineet sisältävät tavallisesti ammoniumnitraattia, trotyyliä, dinitrotolueenia, alumiinia, puujauhoa, polttoöljyä sekä kovettumisen- ja kosteudenestoaineita. Tavallisimpia Suomessa käytettyjä varmuusräjähdysaineita ovat aniitti, ammoniitti ja lieteräjähdysaineet (slurryt).

SUOMESSA VALMISTETTAVIA VARMUUSRÄJÄHDYSAINETA (1994)

Vihtavuori Oy

ANEX	jauhemainen, sisältää ammoniumnitraattia, trotyyliä, räjähdystä nopeuttavaa alumiinia ja vedenestoaineita päällys vahattu paperi, muovipussi
AMONEX N	vaaleapunainen rakeisen ammoniumnitraatin ja polttoöljyn seos päällys muovisäkki
AMONEX K	vaaleasininen rakeisen ammoniumnitraatin ja polttoöljyn seos päällys muovisäkki
KEMIITTI 110	käyttöpaikalla valmistettava vesigeeliräjähdysaine, joka sisältää nitraatteja, öljyä, vettä ja lisäaineita
KEMIITTI 510	voidemainen emulsioräjähdysaine suoraan poranreikään
MENOX 110	punainen muovailtava pentriittiä sisältävä aloitepanos päällys muovia
KEMIX	emulsioräjähdysaine, sisältää nitraattia, öljyä ja vettä, hyvä veden kesto päällys muovia

Forcit Oy

ANIITTI	vaaleankeltainen jauhemainen räjähdysaine, sisältää ammoniumnitraattia, trotyyliä ja alumiinia päällys vahattu paperi, muovipussi, muoviputki
AMMONIITTI	rakeisen ammoniumnitraatin ja polttoöljyn seos päällys muovisäkki, pahvilaatikko

KEVYT

AMMONIITTI	rakeisen ammoniumnitraatin ja polttoöljyn seos päällyys muovisäkki, pahvilaatikko
TNT-LIETE	geelimäinen massa, sisältää trotyyliä, ammoniumnitraattia, alumiinia, vettä ja sideainetta päällyys muovipussi

9.3.6.4 SOTILASRÄJÄHDYSAINHEET

Sotilasräjähdysaineita käytetään nimensä mukaisesti sotilaallisiin tarkoituksiin esim. miinoihin ja pommeihin. Niiden tulee kestää pitkiä säilytysaikoja ja olla epäherkkiä ulkoisille tekijöille. Tavallisimpia sotilasräjähdysaineita ovat trotyyli, heksogeeni, heksotoli, m-heksogeeni, oktogeeni, oktoli, pentriitti, tetryyli, amatoli, heksotonaali ja heksaali. Näiden kemiallista rakennetta on selostettu lyhyesti Yallopin (1980) kirjassa.

Yleisin sotilaallisiin tarkoituksiin käytetty räjähdysaine on trotyyli (TNT). TNT:n käyttöturvallisuus ja säilyvyys ovat melko hyvät. Sitä on myös helppo valaa alhaisen sulamislämpötilansa (81 °C) vuoksi. Trotyyliä käytetään myös muiden vaikeasti valettavien räjähdysaineiden valamiseen. TNT kestää myös puristamista. Kemialliselta koostumukseltaan TNT (trinitrotolueeni) kuuluu aromaattisiin nitroyhdisteisiin (Johansson ja Persson 1970).

Toinen yleisesti käytetty sotilasräjähdysaine on heksogeeni (RDX), joka on tehokkaampi räjähdysaine kuin TNT. Heksogeenia ei voida valaa eikä puristaa. Kemialliselta koostumukseltaan se kuuluu heterosyklisiin nitramiineihin (Johansson ja Persson 1970).

Oktogeeni (HMX) on n. 10 % tehokkaampaa kuin RDX ja herkkyydeltään samankaltaista. Sille on ominaista suuri tiheys, detonaationopeus ja -paine. Se on noin 10 kertaa kalliimpaa kuin trotyyli. Oktogeenia voidaan käyttää nitramiiniaruudeissa ja muovisidosteisissa räjähdysaineissa. Se on kemialliselta rakenteeltaan nitramiini (Johansson ja Persson 1970).

Pentriittiä (PENT) ei voida valaa, mutta kylläkin puristaa. Se on melko isku- ja hankausherkkää ja sitä voidaan käyttää räjäyttimissä ja räjäytysnalleissa sekä muovailtavana muovisidosteisena erikoistarkoituksiin. Kemialliselta rakenteeltaan se on typpihapon esteri (Johansson ja Persson 1970).

Tetryylin käyttö on vähentynyt aineen myrkyllisyyden vuoksi.

9.3.6.5 RUUDIT

Ruudit voidaan jakaa käyttötarkoituksen mukaan ase- ja raketiruuteihin. Koostumuksen mukaan jako voidaan tehdä seuraavasti: yksipohjaruudit (N-ruudit, peruskomponenttina nitroselluloosa), kaksipohjaruudit (B-ruudit, nitroselluloosa ja nitroglyseroli), kolmipohjaruudit (D-ruudit, nitroselluloosa, nitroguaniini ja dietyleeniglykolidinitraatti), mustaruuti (kaliumnitraatin, hiilen ja rikin

mekaaninen seos), komposiittiruudit (rakettiruudit, hapettimen ja paloaineen mekaaninen seos) ja nitramiiniruudit (HMX ja/tai RDX).

Ruutien palamisnopeus on pienempi kuin varsinaisilla räjähdysaineilla, ja siihen voidaan vaikuttaa ruudin huokoisuudella, raekoolla ja koostumuksella.

9.3.6.6 PYROTEKNISET AINEET

Pyroteknisiä aineita ovat mm. sytytys-, merkinanto-, ilotulitus-, tulensytytys- tai savutusaineita, jotka ilman ulkopuolista happea synnyttävät valoa, lämpöä, ääntä, savua, sumua, kaasua tai muita näihin verrattavia ilmiöitä. Vastaavia kaupallisia tuotteita ovat esimerkiksi ääntä tuottavat papatit ja noitapillit, lämpöä synnyttävät tulitikut ja tähtisädetikut, valoa tuottavat hätä- ja ilotulitusraketit.

Pyroteknisten massojen polttoaineena on alkuaine tai yhdiste, joka voi luovuttaa elektroneja joko palaen tai hapettuen. Tavallisimpia massojen polttoaineita ovat metallijauheet (alumiini, magnesium, kupari, sinkki), fosfori, hiili, rikki, boori, orgaaniset yhdisteet (antraseeni, naftaleeni), polymeerit jne. Hapettimena eli elektronien vastaanottajana käytetään kloraatteja, perkloraatteja jne. Lisäksi massoissa käytetään erilaisia lisäaineita kuten sideaineita, kosteudensuojaj-aineita ja reaktionopeutta sääteleviä aineita.

9.3.6.7 SYTYTYSTARVIKKEET

Varsinaisen räjähdysaineen sytyttämiseen voidaan käyttää tulilankoja ja erilaisia nalleja. Aikatulilanka on bitumipäällysteistä tekstiililankaa, joka sisältää mustaruutisydämen. Räjähävä tulilanka on muovipinnoitteista räjähdysainetta sisältävää lankaa. Tulilankanalli, joka sytytetään aikatulilangalla, soveltuu lähes kaikkien räjähdysaineiden räjäyttämiseen. Sähköräjäytysnallit jaetaan käyttötarkoituksensa mukaan momentti-, lyhyhidaste- ja pitkähidastennalleihin. Sähkönallien virtajohtimet oikosuljetaan kuorimalla johtimista noin 1 cm ja kiertämällä johtimet toistensa ympäri. Näin estetään nallien syttyminen esim. staattisen sähköön vaikutuksesta. Samasta syystä nalleja ei saa säilyttää tai kuljettaa muovipussissa.

Sytyttämiseen voidaan käyttää myös Nonel-järjestelmää, joka koostuu räjähdysaineesta, nalleista ja ryhmäsytyttimistä. Nonel-järjestelmän perusosa on johtimena toimiva Nonel-letku, joka on halkaisijaltaan noin 3 mm paksua muovilettoa. Letkun sisäpuoli on ohuen räjähdysainekerroksen peittämä. Letkun toiseen päähän kiinnitetään Nonel-räjäytysnalli, joita on saatavilla eri johdinpituuksille. Käytettäessä Nonel-järjestelmää kytkeä varten ryhmäsytyttimenä, letkun toinen pää suljetaan ja toiseen päähän kiinnitetään aloitinnalli kytkeä varten sisälle. Nonel-nalli tai ryhmäsytytin tehdään vaarattomaksi leikkaamalla letku poikki ja tiivistämällä reikään jäänyt osa reiän sisälle.

Sähkönallit jaetaan niiden vaatiman sytyttämisenenergian W_t perusteella ryhmiin (SFS 3500, 1982):

ryhmä B: $W_t = 8...16 \text{ mJ}/\Omega$

ryhmä C: $W_t = 80...160 \text{ mJ}/\Omega$

ryhmä D: $W_t = 1100...2500 \text{ mJ}/\Omega$

Jokainen ryhmä jaetaan paloaikaporrastuksen perusteella seuraaviin lajeihin:

laji a) momentti- eli M-sähkönallit

laji b) lyhyhidaste eli L-sähkönallit, joiden paloaikojen ero perättäiset hidastenumerot omaavilla nalleilla on enintään 100 ms

laji c) pitkähidaste eli P-sähkönallit, joiden paloaikojen ero perättäiset hidastenumerot omaavilla nalleilla on suurempi kuin 100 ms.

Sähkönallien eri ryhmät lajeineen erotetaan toisistaan eristyksen värin perusteella taulukon 9.1 mukaisesti (SFS 3500, 1982).

Taulukko 9.1. Sähkönallien johtimien eristyksen värit (SFS 3500, 1982).

Laji	Ryhmä		
	B	C	D
M	sininen	vihreä	ruskea
	sininen	vihreä	ruskea
L	sininen	vihreä	ruskea
	keltainen	keltainen	keltainen
P	sininen	vihreä	ruskea
	oranssi	oranssi	oranssi

Kohtaan 9.3.6 liittyvää kirjallisuutta: Bauer ja Koza (1990), Hoffman ja Bayall (1974), Jenkins et al. (1989), Marinkas (1986), Meyer (1987), Midkiff ja Washington (1976), Räjähdystarvikekaupan opas (1988), Räjähdystarvike tiedosto (1991), Yinon ja Zitrin (1981), Yinon (1993).

9.4 RÄJÄHDYKSEN VAIKUTUKSET

9.4.1 Luokitus vaurioiden mukaan

Räjähdyksen luokitus sen aiheuttamien vaurioiden mukaan voi tutkimuksen kannalta olla hyödyllistä. Vaurioiden laajuus riippuu enemmän paineennousunopeudesta ja räjähdystä ympäröivien rakenteiden lujuudesta kuin suurimmasta kokonaispaineesta. Ohje NFPA 921 (1995) jakaa räjähdykset karkeasti kahteen ryhmään, alemman luokan (low order) ja ylemmän luokan (high order) räjähdysiin.

Alemman luokan räjähdysten vaikutukset syntyvät hitaista paineennousunopeuksista ja tunnusomaisia ovat verraten suuret, vain lyhyehkön matkan lentäneet jäännökset. Pullistuneet tai kaatuneet, lähes ehjät seinät rakennuksen vieressä ja hieman kohonnut mutta takaisinpuodonnut katot ovat tyypillisiä näiden räjähdysten jälkiä. Ikkunat ja ovet ovat usein lentäneet paikoiltaan jopa lasiruudun särkymättä ennen maahan putoamista. Lieriömäisten säiliöiden seinämät ovat litistyneet.

Ylemmän luokan räjähdyksille ovat tunnusomaisia pienet murskatut jäännöskappaleet, jotka ovat lentäneet pitkiä matkoja räjähdysten alkukohtasta. Seinät, katot ja muut rakenneosat ovat pirstoutuneet, särkyneet tai kokonaan hävinneet. Räjähdysten jäännöksiä saattaa löytyä satojen metrien päästä räjähdyspaikasta. Lieriömäisten säiliöiden ulkoseinämät ovat murtuneet moneksi pieneksi kappaleeksi ja lentäneet kauaksi suurella nopeudella ja liikemäärällä. Ylemmän luokan räjähdysten paineennousunopeus on NFPA 921:n mukaan jopa yli 60 bar/s.

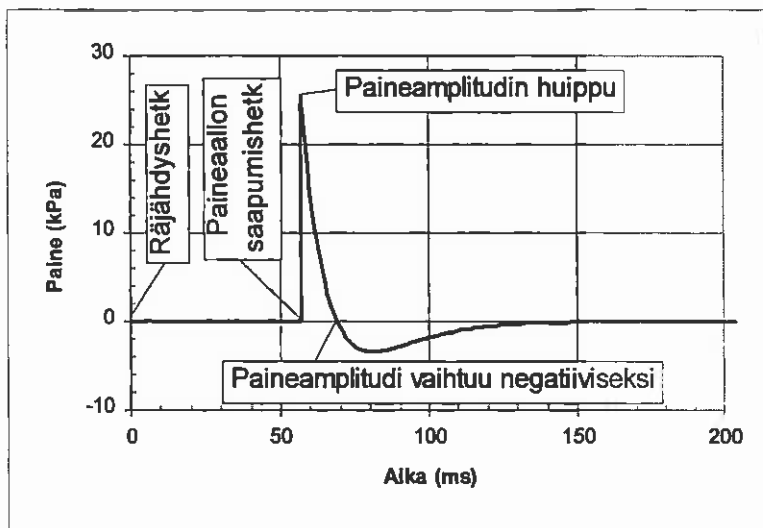
9.4.2 Räjähdysten seuraukset

Bakerin ym. (1983) kirja käsittelee erilaisten räjähdysten vaikutuksia mekaniikan ja lujuusopin menetelmin. Se on parhaita lähdeaineita arvioitaessa räjähdysten vaikutuksia tiettyihin rakenteisiin kvantitatiivisesti. NFPA 921 jakaa räjähdysten seuraukset neljään pääryhmään: paineaallon vaikutus, sirpaleiden vaikutus, lämpövaikutus ja seisminen vaikutus.

Paineaallon vaikutus

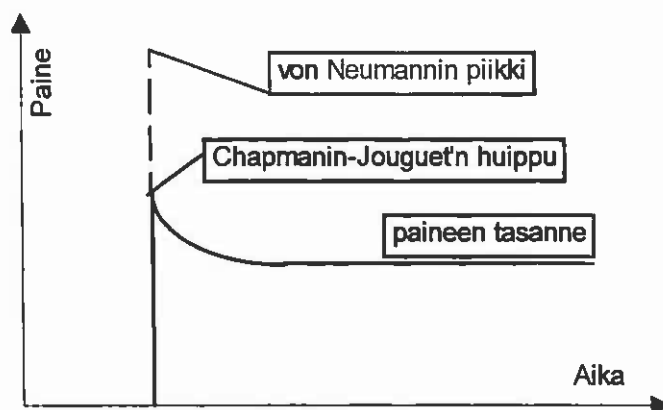
Räjähdyksessä syntyvä paineaalto laajenee hyvin nopeasti ja siirtyy ulospäin räjähdysten alkukohtasta. Räjähdykseen liittyvät vauriot ja vahingot ovat ensisijaisesti laajenevan paineaallon aiheuttamia. Paineaallon laajentuessa ulospäin ympäröivä ilma siirtyy, puristuu ja kuumenee. Räjähdysten alkupisteeseen syntyy silloin lievä alipaine ympäristöön nähden. Kun paineaalto leviää, ilmaa virtaa takaisin räjähdysten alkupistettä kohti. Tämä alipainevirtaus voi aiheuttaa sekundäärisiä vaurioita ja siirtää esineitä alkukohtaan suuntaan, joskus niinkin paljon, että räjähdysten alkukohta peittyi palojäännösten alle. Alipainevirtaus on tavallisesti hyvin paljon heikompi kuin ulospäin laajeneva paineaalto, mutta saattaa olla riittävä hajottamaan jo vaurioituneita rakenteita.

Paineaaltoa vaurioiden suuruuden laskemiseksi käsittelevät Baker ym. (1980, s. 111 - 114) sekä Lees (1980, luku 17.5). Kuvassa 9.3 on esimerkkinä laskettu paineaallon amplitudi ajan kuluessa kiinteässä, 30 m:n päässä 250 kg:n trotyylipanoksen räjähdyskeskuksesta olevassa havaintopisteessä käyttäen Friedlanderin muotoyhtälöä (Lees 1980).



Kuva 9.3 Paineaallon amplitudin muuttuminen ajan mukana kiinteässä havaintopisteessä räjähdyspaikan ulkopuolella (Leesin 1980 mukaan).

Putkessa etenevän detonaatioaallon amplitudin muuttuminen ajan mukana kiinteästä havaintopisteestä mitattuna on esitetty kuvassa 9.4. Aallon etureunassa paine nousee mikrosekunissa tyypillisesti 2 ... 3 MPa:n lukemaan (von Neumannin piikki). Paine putoaa kymmenessä mikrosekunissa detonaatiopaineeseen (Chapmanin-Jouguet'n huippu, tyypillisesti yli 1 MPa), tasoittuen muutamassa millisekunissa tasanteen arvoon, mikä on likimain sama kuin suljetussa astiassa tapahtuvan humahduksen loppupaine (luokkaa 0,5 MPa).



Kuva 9.4. Putkessa etenevän detonaatioaallon paineamplitudin muuttuminen ajan mukana kiinteästä havaintopisteestä katsottuna (Leesin 1980 mukaan).

Idealisissa olosuhteissa räjähdysen paineaalto etenee tasaisella nopeudella (äänen nopeus) pallomaisena alkupisteestä ulospäin. Todellisuudessa osittaiset tai kokonaiset sulkeumat ja esteet muuttavat paineaallon muotoa, suuntaa ja voimaa.

Rajoittavan säiliön tai rakenteen paineenkevennys voi aiheuttaa vaurioita tämän ulkopuolella. Suurimmat vauriot ovat silloin odotettavissa paineenkevennyksen suunnassa, esimerkiksi huoneessa tapahtuneen räjähdysen paineaalto joka kulkeutuu oviaukosta naapurihuoneeseen vaurioittaen esineitä oviaukon linjassa.

Paineaalto erityisesti detonaatiossa voi myös heijastua esteestä ja muuttaa suuntaa, huomattavasti voimistuen tai mahdollisesti heikentyen esteen ominaisuuksista riippuen. Säiliössä tapahtuneesta detonaatoräjähdyksestä jää tyypillisiä, verkkomaisia jälkiä säiliön seiniin, joista detonaatio voidaan tunnistaa (Behrens ym. 1991, Lewis ja von Elbe 1961).

Tilareaktioissa ja rintamareaktioiden kulutettua polttoaineen loppuun, laajenevan paineaallon paineamplitudi pienenee kun etäisyys räjähdysen alkukohdasta kasvaa.

Paineaallon aiheuttama vahinko ei riipu pelkästään räjähdyksessä vapautuneesta energian määrästä, vaan myös energian vapautumis- ja paineen purkautumisnopeudesta, joista usein riippuu vahingon suuruus.

Karkeasti ottaen Hopkinsonin lain mukaan räjähteen paineaallon voimakkuus samanlaisissa olosuhteissa skaalautuu verrannollisena etäisyyden kolmanteen potenssiin (Lees 1980). Lees (1980) ja Baker ym. (1983) sisältävät käyrästäjä, joiden perusteella voidaan arvioida joko paineaallon voimakkuus etäisyyden funktiona räjähdyskeskuksesta tai kääntäen arvioida käytetyn räjähdysaineen määrä, kun katsotaan tietyillä etäisyyksillä syntyneitä rakenteellisia vaurioita. Paineamplitudin lisäksi vaurioiden synnyn arvioimisessa lasketaan räjähdysaallon kohteelle aiheuttama ylipaineimpulssi, mikä on ensimmäisen paineaallon positiivisen vaiheen aikaintegraali. Korkeilla ylipaineilla dynaaminen impulssi, mikä määrittellään ensimmäisen paineaallon dynaamisen paineen aikaintegraalina, on mitoittava tekijä. Tällöin myöskin rakenteiden vaste on laskettava käyttäen dynaamista lujuuksia staattisen lujuuksien asemesta (Baker ym. 1983).

Sirpaleiden vaikutus

Kun paineaaltoa ympäröivä säiliö tai muu rakenne repeää, tämä hajoaa usein moneen osaan, jotka saattavat lentää huomattavan pitkälle. Nämä sirpaleet voivat aiheuttaa suurta vahinkoa sekä esineille että henkilöille. Sirpaleet voivat lisäksi vahingoittaa sähkö- tai kaasujohtoja tai palavia aineita sisältäviä säiliöitä sekä tällä tavalla laajentaa ja pahentaa räjähdystä seuraavaa paloa tai aiheuttaa uusia räjähdyksiä. Sirpaleiden muodostumista ja niiden kantomatkan arvioimista on käsitelty kvantitatiivisesti Bakerin ym. (1983) kirjan luvussa 6.

Lämpövaikutus

Palamisräjähdykset vapauttavat paljon lämpöä, joka kohottaa palamiskaasujen ja ympäröivän ilman lämpötilaa. Nämä voivat sytyttää lähellä olevia palavia aineita tai aiheuttaa palovammoja henkilöille. Näin syntynyt tulipalo suurentaa räjähdysen aiheuttamia vahinkoja sekä vaikeuttaa tutkimustyötä. Detonaatiossa syntyy erittäin korkeita lämpötiloja, jotka ovat hyvin lyhytkestoisia (kuva 9.4), kun taas humahdus tuottaa alhaisempia lämpötiloja, joiden kesto voi olla paljon pitempi. Räjähdyksessä syntyvästä tulipallosta energia leviää ympäristöön lämpösäteilynä suoraviivaisesti. Lämpöpulssin kesto ja voimakkuus vaikuttavat lämpövaikutuksen aiheuttamiin vaurioihin. Voimakkaiden lämpöpulssien vaikutuksesta henkilöihin ja rakenteisiin on kerätty tietoa pääasiassa ydinräjäytyksistä. Erilaisia puolikokeellisia laskentakaavoja löytyy Leesin (1980) kirjan sivuilta 526 - 527, Bakerin ym. (1983) luvusta 7 sekä Glasstonen (1962) teoksesta.

Seisminen vaikutus

Kun räjähdysen paineaalto laajenee ja rakennuksen sortuneet osat kaatuvat maahan, huomattavia värähtelyjä voi levitä maan ja kallioperän välityksellä. Tällaiset järjestykset eivät ole kovin tavallisia ja jäävät yleensä hyvin paikallisiksi ja lyhytkestoisiksi, mutta voivat vaurioittaa maanalaisia vesi- tai viemärijohtoja, säiliöitä tai sähkökaapeleita rakennuksen perustuksien läheisyydessä.

9.4.3 Räjähdysen seurauksiin vaikuttavat seikat

Seuraavassa esitetään joukko räjähdysen seurauksiin vaikuttavia seikkoja. Näiden tekijöiden vaihtelut ja niiden monet yhdistelmämahdollisuudet voivat aiheuttaa suuren määrän erilaisia vaikutuksia. Kuitenkin yksinkertaisimmillaan paineen kehittyminen suljetussa, muodoltaan säännöllisessä astiassa voidaan laskea jopa analyttisesti suljetussa muodossa esitettävillä kaavoilla, kun polttoaineena on yksinkertainen, säiliöön tasaisesti jakautunut kaasuseos ja kun räjähdysen lämpöhäviöt säiliön seinämiin jätetään ottamatta huomioon (Harris 1983).

Polttoaineen laatu ja muoto

Erilaiset polttoaineet, niiden määrä, sijainti, laajuus, seossuhteet (kohta 9.3.3 ja 9.3.4), tiheys (kohta 9.3.3) ja pyörteisyys vaikuttavat huomattavasti räjähdysen seurauksiin.

Rajoittavan säiliön, rakenteen tai esteen laatu, koko, tilavuus ja muoto

Räjähdystilan seinämien rakenne, muoto, tilavuus ja materiaali vaikuttavat huomattavasti räjähdysen seurauksiin. Vaikutus kohdistuu pääosin paineen-ousunopeuteen. Tämä on kääntäen verrannollinen räjähdystilaa ympäröivän säiliön säteeseen (Zalosh 1995).

Yleisenä sääntönä voidaan pitää, että mitä pienempi säiliön tilavuus on, sitä suurempi on maksimipaineennousunopeus tietyllä polttoaine/ilmaseokselle ja sitä suurempi on räjähdysten kiivaus ja sen aiheuttamat vahingot (NFPA 921, 1995).

Turbulenssi kaasu-ilma- tai pöly-ilmaseoksessa nostaa palamisnopeutta, paineennousunopeutta ja kokonaispainetta. Turbulenssia voivat aiheuttaa säiliössä olevat esteet, kuten huoneen pilarit, koneet, laitteet tai muu sisustus. Erilaiset tuulettimet ja koneellinen ilmanvaihto voivat myös aiheuttaa pyörteitä ja pahentaa räjähdysten seurauksia.

Syttymislähteen sijainti ja koko

Idealisessa, symmetrisessä tapauksessa suurin paineennousunopeus syntyy, jos syttymislähde on rakennuksen keskellä. Mitä lähempänä seinää syttymislähde on, sitä nopeammin liekkirintama lähestyy seinää ja jäähtyy, kun siitä siirtyy lämpöä seinään. Tämä energiahäviö pienentää paineennousunopeutta ja hillitsee räjähdysten voimakkuutta.

Syttymislähteen energia vaikuttaa yleensä vain vähän räjähdysten kehittymiseen. Huomattavan suuret syttymislähteet voivat nostaa paineennousunopeutta ja joissakin tapauksissa aiheuttaa humahduksen kiihtymisen detonaatioksi.

Paineaallon tuuletus tai kevennys

Paineenkevennyksellä pyritään pienentämään räjähdysten painetta päästämällä osa kaasusta pois räjähdystilasta rakennuksen tarkoituksellisesti heikoimpien osien kautta. Tällaisia suunniteltuja paineenkevennysaukkoja on yleensä teollisuusrakennuksissa. Rakennusten ikkunat ja ovet ovat tavallisesti ne osat, jotka pottävät ensiksi rakennuksessa ja toimivat silloin samalla tavalla paineenkeventäjinä. Ikkunoiden ja ovien koko, lukumäärä ja sijainti vaikuttavat paineen muodostumiseen rakennuksessa ja siten räjähdysten vaurioiden suuruuteen. Paineenkevennyksen vaikutuksia kaasuräjähdyksen kulkuun käsittelee Lautkasken (1997) tuore katsaus.

Paineenkevennysaukosta virtaa ainetta, kuumia kaasuja ja liekkejä räjähdystilasta sen ulkopuolelle. Ellei virtaus kevennysaukosta suuntaudu ulko- tai muihin tiloihin, joissa räjähdysliekin haittavaikutukset ovat vähäiset, on mahdollista, että paineenkevennys levittää paloa rakennuksen muihin osiin tai aiheuttaa muita vaaratilanteita.

Detonaatioiden erittäin nopeat iskuaallot ovat yleensä niin nopeita, että paineenkevennys ei ehdi toimia ennen ylemmän luokan räjähdysvaurioiden syntymistä.

9.4.4 Räjähdyskeskus

Yleistä

Räjähdyskeskus on tunnistettavissa kraatterista tai huomattavan suuren vahingon alueesta, joka sijaitsee räjähdysalkukohdassa. Kraatterin olemassaolo osoittaa, että räjähtävä aine on keskittynyt kraatterin keskukseen tai hyvin lähelle sitä. Räjähdyskeskuksen läpimitta voi vaihdella räjähdysvoimakkuudesta riippuen 0,1 m:stä yli sataan metriin, ja siinä on useimmiten selvä kraatteri, josta maapohja, lattia tai muu alusta on murskautunut. Jos räjähdyksessä on muodostunut selvä räjähdyskeskus, niin räjähdyspaine ja paineennoenusopeus ovat tavallisesti olleet korkeat. Kraatterin koon riippuvuutta räjähdysvoimakkuudesta käsittelevät kvantitatiivisesti Johansson ja Persson (1970).

Yleensä katsotaan, että kraatteri syntyy vain räjähdysaallon edetessä yläääninnopeudella (detonaatiot). Poikkeuksena tästä ovat räjähtävän säiliön sirpaleista syntyvät vauriot.

Kaikki räjähdykset eivät aiheuta selviä räjähdyskeskuksia.

Räjähdyksiä, joissa esiintyy räjähdyskeskus

Räjähdysaineet ovat usein tunnistettavissa hyvin keskitetystä räjähdyskeskuksesta, missä on selvä kraatteri ja/tai hyvin paikalliset suuret vauriot.

Höyrykattilan räjähdys aiheuttaa usein selvän räjähdyskeskuksen suuren energian, nopean paineenpurkauksen ja paikallisuuden vuoksi.

Tiiviisti säiliöihin suljetut *polttoainekaasut* tai *nestemäisten polttoaineiden* höyryt voivat aiheuttaa räjähdyskeskuksen.

Höyryräjähdykset (*BLEVE:t*) (kohta 9.2) voivat aiheuttaa räjähdyskeskuksen (kraatterin), jos neste on ollut verraten pienissä säiliöissä (kanisterit ym.) ja paine vapautuu riittävän nopeasti säiliön revetessä.

Räjähdyksiä, joissa ei synny selvää räjähdyskeskusta

Selvää räjähdyskeskusta ei synny räjähdyksissä yleensä, kun polttoaine on jakautunut laajemmalle alueelle räjähdysketkellä. Paineennoenusopeudet ovat lievemmat ja räjähdysnopeus on pienempi kuin äänen nopeus eli kyseessä on humahdus. Toisaalta detonaatiokin saattaa esiintyä tietyissä olosuhteissa ilman selvää räjähdyskeskusta.

Suurissa tiloissa säilytettävän *nestekaasun* tai *maakaasun* räjähdyksissä ei usein esiinny räjähdyskeskusta, ja räjähdykset ovat tavallisesti humahduksia.

Palavien nesteiden höyryjen räjähdykset ovat usein jakautuneet melko suureen tilaan, räjähdykset ovat humahduksia ilman selviä paikallisia, voimakkaasti tuhoutuneita räjähdyskeskuksia.

Pölyräjähdykset aiheuttavat usein huomattavia vahinkoja, mutta tapahtuvat verraten isoissa tiloissa, kuten viljasiiloissa, eivätkä aiheuta selviä räjähdyskeskuksia.

Epätäydellisen palamisen räjähdykset (kohta 9.3.5), missä palavat kaasut yleensä ovat jakautuneet melko laajoille alueille, aiheuttavat lähes aina humahduksen, joka ei muodosta räjähdyskeskustaa.

9.5 RÄJÄHDYSPAIKAN TUTKIMINEN

9.5.1 Yleistä

Räjähdyspaikan tutkiminen ei eroa periaatteessa palopaikan tutkimisesta: määritetään syttymiskohta, polttoaine ja syttymislähde sekä selvitetään syttymiseen johtanut tapahtumasarja. Räjähdyspaikka on usein laajempi ja vauriot suuremmat kuin palopaikalla, ja tutkimuksen järjestelmällinen suunnittelu ja toteutus on jos mahdollista vielä tärkeämpää kuin tavanomaisessa palonsyyn tutkimisessa.

Ensimmäinen toimenpide on räjähdyspaikan ja sen ympäristön eristäminen. Asiattomien henkilöiden pääsy räjähdysalueelle ja heidän mahdollisuutensa päästä käsiksi kauempanakin oleviin palojäännöksiin estetään. Räjähdyksestä jääneet todistuskappaleet saattavat olla hyvinkin pieniä ja ovat helposti ohikulkevien henkilöiden siirrettävissä tai tuhottavissa. Huolellinen eristäminen parantaa myös sekä tutkijoiden että uteliaan yleisön työturvallisuutta. NFPA 921 (1995) neuvoo yleisenä sääntönä, että eristettävän alueen säteen olisi oltava 1,5 kertaa kauimpaa löydetyt palojäännöksen etäisyys räjähdyskeskikohdasta. On huomattava, että palojäännökset voivat lentää pitkiäkin matkoja sekä porautua lähellä olevien rakennuksien, kulkuvälineiden ym. kappaleiden sisään.

Eristetty alue käydään sitten läpi alkaen sen uloimmasta kehästä ja siirrytään kohti suurimman vaurion aluetta. Räjähdyskeskipiste määritetään vasta sen jälkeen kun muu alue on tutkittu. Jos on riittävästi henkilöitä alueen tutkimiseksi, alue jaetaan osiin näiden kesken. Suurin varmistus saadaan käymällä alue läpi kahdesti siten, että eri alueiden tutkijat vaihtavat alueita keskenään. Löydetyt esineet merkitään sopivalla tavalla, valokuvataan ja dokumentoidaan (vertaa luku 3). Dokumentoinnin jälkeen esineet voidaan ottaa talteen mahdollisia jatkotutkimuksia varten.

Yleisten työturvallisuusnäkökohtien (kohta 3.1) lisäksi on hyvä ottaa huomioon seuraavat seikat:

- Räjähdyskeskipisteiden jälkeen rakenteiden vauriot saattavat olla suurempia kuin tulipalossa ja lattioiden, seinien, kattojen tai koko rakennuksen sortumisvaara on usein suurempi.
- Polttoainekaasu-, -höyry- tai pölyräjähdyksissä peräkkäisten räjähdysten sarjat ovat tavallisia. Jos tutkimus alkaa kohta

räjähdyksen jälkeen, tähän varaudutaan. Kaasuvuodot tukitaan ja palavien nesteiden lammikot poistetaan ennen työn aloittamista.

- Jos räjähdykseen liittyy räjähdysaineita tai varsinaisia pommeja, on mahdollista, että paikalla on räjähtämätöntä ainetta. Alueen tutkinnassa etsitään tällaisia erityisellä huolella. Jos räjähtämätöntä ainetta löytyy, siihen ei saa koskea eikä sitä saa siirtää. Alue tyhjennetään ihmisistä, eristetään ja räjähdysaine- tai pommiasiantuntijat kutsutaan paikalle selvittämään tilanne.

9.5.2 Räjähdyspaikan ensiarviointi

Ensimmäiseksi selvitetään onko kyseessä ollut räjähdys, tulipalo tai molemmat sekä kumpi näistä tapahtui ensimmäiseksi. Etsitään jälkiä, jotka viittaavat ylipaineeseen rakenteissa. Tähän kuuluu seinien, lattioiden, kattojen, ovien, ikkunoiden ja muiden rakennusosien ja sisustuksen rikkoutuminen, siirtyminen tai paisuminen. Arvioidaan, onko pelkästään tulipalo voinut aiheuttaa rakennuksessa olevat vauriot.

Pyritään määrittämään, onko räjähdys alemman vai ylemmän luokan räjähdys (kohta 9.4.1) ja löytyykö selvä räjähdyskeskus (kraatteri) (kohta 9.4.4).

Selvitetään, mitä polttoaineita on ollut käytettävissä palo- tai räjähdyspaikalla, erityisesti polttoaineena käytetyt kaasut, palavat nesteet ja pölyt. Analysoidaan räjähdysten vahinkojen luonne ja vertaillaan vauriokuvioihin, joita usein esiintyy seuraavien aineiden räjähdyksissä:

- a) ilmaa kevyemmät kaasut
- b) ilmaa raskaammat kaasut
- c) nestemäisten polttoaineiden höyryt
- d) pölyt
- e) räjähdysaineet
- f) epätäydellisen palamisen kaasut
- g) höyryräjähdykset.

Taulukossa 9.2 vertaillaan yleisellä tasolla erilaisten räjähdysten aiheuttamia vaurioita ja niiden liittymistä erilaisiin räjähdysaineisiin. Taulukosta voi olla apua mahdollisten räjähdystyyppien rajaamiseksi tutkimuksissa.

Taulukko 9.2. Räjähdyksien tyypillisiä tunnusmerkkejä. 0 = ei koskaan, 1 = harvoin, 2 = joskus, 3 = usein, 4 = lähes aina, 5 = aina (NFPA 921, 1995).

Tunnusmerkki	Ilmaa kevyemmät kaasut	Ilmaa raskaammat kaasut	Nestemäisten polttoaineiden höyryt	Pölyt	Räjähdysaineet	Epätäydellisen palamisen kaasut	Höyry-räjähdys
Alemman luokan vauriot	3	4	4	2	2	5	2
Ylemmän luokan vauriot	2	1	1	2	3	0	2
Sekundaariräjähdykset	3	3	2	4	0	1	0
Kaasu/höyry/pölykertymät	3	2	2	2	0	0	0
Humahdus ^{A)}	4	4	4	4	1	5	4 ^{B)}
Detonaatio	1	1	1	1	4	0	1 ^{B)}
Maanalainen eteneminen	2	2	2	0	0	0	0
Höyryräjähdys	2	3	5	0	0	0	5
Palo räjähdysksen jälkeen	3	3	4	3	1	5	3
Palo ennen räjähdystä	2	2	2	3	2	5	4
Räjähdyskeskus	0 ^{C)}	0 ^{C)}	0 ^{C)}	0	4 ^{D)}	0	2
Minimisyttymisenergia (mJ)	0,17...0,25	0,17...0,25	0,25	10...40	E)		F)

^{A)} Humahdus saattaa muuttua detonaatioksi tietyissä olosuhteissa.

^{B)} Rajoittavan astian lujuus saattaa johtaa yliaänpaineaaltoon repeämisen jälkeen.

^{C)} Kaasut ja höyryt voivat aiheuttaa räjähdyskeskuksia, jos ne ovat pienissä astioissa ja aine, johon räjähdys kohdistuu, puristuu riittävästi kokoon tai pirstoutuu riittävästi.

^{D)} Kaikki detonaatiota aiheuttavat ja jotkut humahdusta aiheuttavat räjähdysaineet saavat aikaan räjähdyskeskuksia, jos aine johon räjähdys kohdistuu, puristuu riittävästi kokoon tai pirstoutuu riittävästi.

^{E)} Syttymisenergiat vaihtelevat huomattavasti. ^{F)} Höyryräjähdykset eivät ole palamisreaktioita.

9.5.3 Yksityiskohtainen arviointi

Kärkeasta ensiarviosta siirrytään paineaallon vaikutusten ja palojäännösten tarkempaan tutkimiseen. Tunnistetaan, mikä räjähdykseen liittyvä ilmiö on vaikuttanut vaurioituneisiin rakenteisiin tai esineisiin:

- a) paineaallon ylipaine
- b) paineaallon alipaine
- c) sirpaleiden osumat
- d) lämpösäteily
- e) seismiset vaikutukset.

Eri kohtien vauriot tutkitaan ja luetteloidaan: onko kohta pirstoutunut, taipunut, rikkoontunut, litistynyt tai muulla tavalla vaurioitunut. Mahdolliset jälkien muutokset ja vaihtelut tarkistetaan myös. Jos kyseessä on detonaatio, niin kaukana räjähdyskeskuksesta paineen nousu on heikompi ja vaikutukset muistuttavat humahduksen jälkiä, kun taas detonaation räjähdyskeskuksen lähellä esiintyy pirstoutumista ja pieniin osiin.

Räjähdyspaikka tutkitaan tarkasti. Paikalle kuulumattomat esineet ja niiden jäännökset kerätään talteen, kuten myös räjähdyskeskuksen palojäännökset. Nämä saattavat olla esimerkiksi alkuperäisen säiliön osia tai kotitekoisen pommin osia, joiden tunnistaminen voi vaatia rikoslaboratorion analysointia.

Kaikki oleelliset esineet ja jäljet paikallistetaan, tunnistetaan, kirjataan, valokuvataan ja otetaan tarvittaessa talteen jatkotutkimuksia varten. Räjähdysten luonteen takia tällaisia esineitä voivat löytyä monesta eri paikasta kuten räjähtäneen rakennuksen seinistä tai sen ulkopuolelta luonnosta, ympäröivien rakennusten seinistä, muista rakenteista tai rakennuksen sisäpuolelta.

Kaikki vaurioituneet ja siirtyneet rakenteet, kuten seinät, lattiat, sisä- ja ulkokatto, perustukset, pilarit, palkit, ovet, ikkunat, jalkakäytävät, ajotiet ja istutukset dokumentoidaan.

Samoin tutkitaan ja dokumentoidaan rakennuksen sisustus: huonekalut, laitteet, lämmitys ja ruoanvalmistusvälineet, työkalut, uhrien vaatetus ym.

Erityisesti kiinnitetään huomiota sähkö-, kaas-, öljy- tai muun polttoaineen mittauskytkentä- ja säätölaitteisiin, säiliöihin ja johtoihin.

Jos räjähdyksessä on vahingoittunut ihmisiä, niiden kehoissa tai vaatetuksessa voi olla räjähdysjäännöksiä. Vahingoittuneiden tai surmansa saaneiden henkilöiden vahingot valokuvataan ja mahdollisissa kirurgisissa toimenpiteissä poistetut esineet otetaan talteen. Henkilöiden vaatetus otetaan talteen tutkimuksia varten.

Paineaallon fysiologisia vaikutuksia ihmisiin esitetään taulukossa 9.3.

Taulukko 9.3. Paineaallon fysiologiset vaikutukset ihmisiin (Cruice 1986).

Fysiologinen vaikutus	Maksimiylipaine (kPa)
Henkilö kaatuu maahan	7
Tärykalvo repeää	34
Keuhkovaurio	100
Kuolemaan johtavien vahinkojen alaraja	240
50 % kuolleisuus	345
99 % kuolleisuus	450

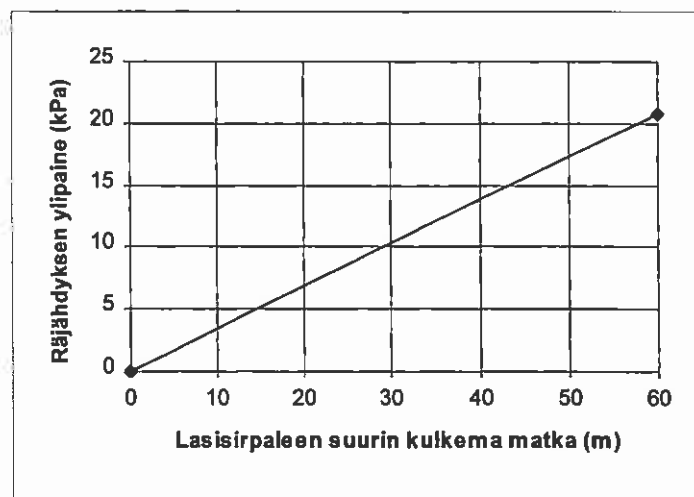
Taulukossa 9.4 esitetään karkeasti räjähdysen maksimiylipaineen vaikutus rakennuksen ulko-osiin. Taulukosta voidaan karkeasti arvioida räjähdysen maksimiylipaine rakennuksen vaurioiden laadusta. Samanlaatuisia vaurioita esiintyy myös rakennuksen sisäpuolella, mutta vastaavat painearvot saattavat poiketa taulukon arvoista. Erilaiset rakennusmateriaalit ja rakenteet voivat myös vaikuttaa maksimipainelukemiin.

Taulukko 9.4 Esimerkkejä räjähdysten maksimiylipaineista ja vastaavista vaurioista (Lees, 1980).

Vaurio	Ylipaine (kPa)
Rikkoutuneet ikkunalasit	3...7
Vähäisiä vaurioita talojen rakenteissa	5
Rakennusten osittainen hajoaminen	7
Liitosten pettäminen rakennuksissa	7...14
Talojen seinien ja kattojen osittainen sortuminen	14
Raudoittamattoman betonin pirstoutuminen	14...20
Tiilimuurauksen 50-%-nen tuhoutuminen	17
Öljysäiliöiden repeäminen	21...28
Puisten puhelinpylväiden katkeaminen	34
Talojen lähes täydellinen tuhoutuminen	34...48
Kuormattujen junavaunujen kaatuminen	48
Rakennusten täydellinen tuhoutuminen todennäköistä	69

Palon jäljistä yritetään päätellä, ovatko ne räjähdystä edeltävän palon vai räjähdysaiheuttamia. Tutkitaan, onko räjähdyskeskuksesta sinkoutuneissa palojäännöksissä tulipalon jälkiä. Jos on, se saattaa olla osoitus siitä, että palo syttyi ennen räjähdystä.

Tavallisin merkki painealosta ovat lasinkappaleet ja sirut, jotka ovat lentäneet jonkin matkaa rakennuksen ikkunoista. Kuvassa 9.5 esitetään ikkunalasin sirpaleiden kulkema suurin matka räjähdyspaineen funktiona (Harris 1983). Taulukon 9.4 mukaan ikkunalasi rikkoontuu 3...7 kPa:n paineella, jolloin kuvan 9.5 mukaan lasinsirpaleita tulisi löytyä muutaman metrin päässä rakennuksesta ja jopa kauempaakin. Räjähdys rikkoo yleensä ikkunalasin moneksi pieneksi palaseksi, kun taas lämpörasituksen takia rikkoontunut lasi hajoaa muutamaksi isoksi palaseksi. Lämmön takia rikkoontuneen ikkunan osat löytyvät useimmiten läheltä ikkunaa sen alapuolelta.



Kuva 9.5. Tavallisen ikkunalasin sirpaleiden kulkema matka eri räjähdyspaineilla (Harris 1983).

Pyrolyysituotteiden räjähdyksissä (kohta 9.3.5) paineet saattavat nousta 5...10 kPa:iin (Harris 1983) ja voivat siten rikkoa ikkunoita ja sirpaleet saattavat lentää jonkin matkaa. Koska tapahtumaan liittyy epätäydellistä palamista, joka yleensä on kestänyt jonkin aikaa, huone on ehtinyt nokeentua ja myös ikkunalasin sirpaleiden toinen pinta on silloin yleensä nokeentunut.

Yleensä, savu- tai nokijäljet lasinsirpaleissa voivat osoittaa, että räjähdys tapahtui sen jälkeen, kun rakennus oli ollut jonkin aikaa tulella, ja täysin puhtaat lasinsirpaleet kaukana rakennuksesta voivat osoittaa, että räjähdys edelsi tulipalaa.

Sulaneiden ja uudelleen jämettyneiden jäännösten virtaussuunnat saattavat osoittaa, miten ne ovat sijainneet lämmölle altistumisen hetkenä.

9.5.4 Syttymiskohta ja polttoaine

9.5.4.1 SYTTYMISKOHTA

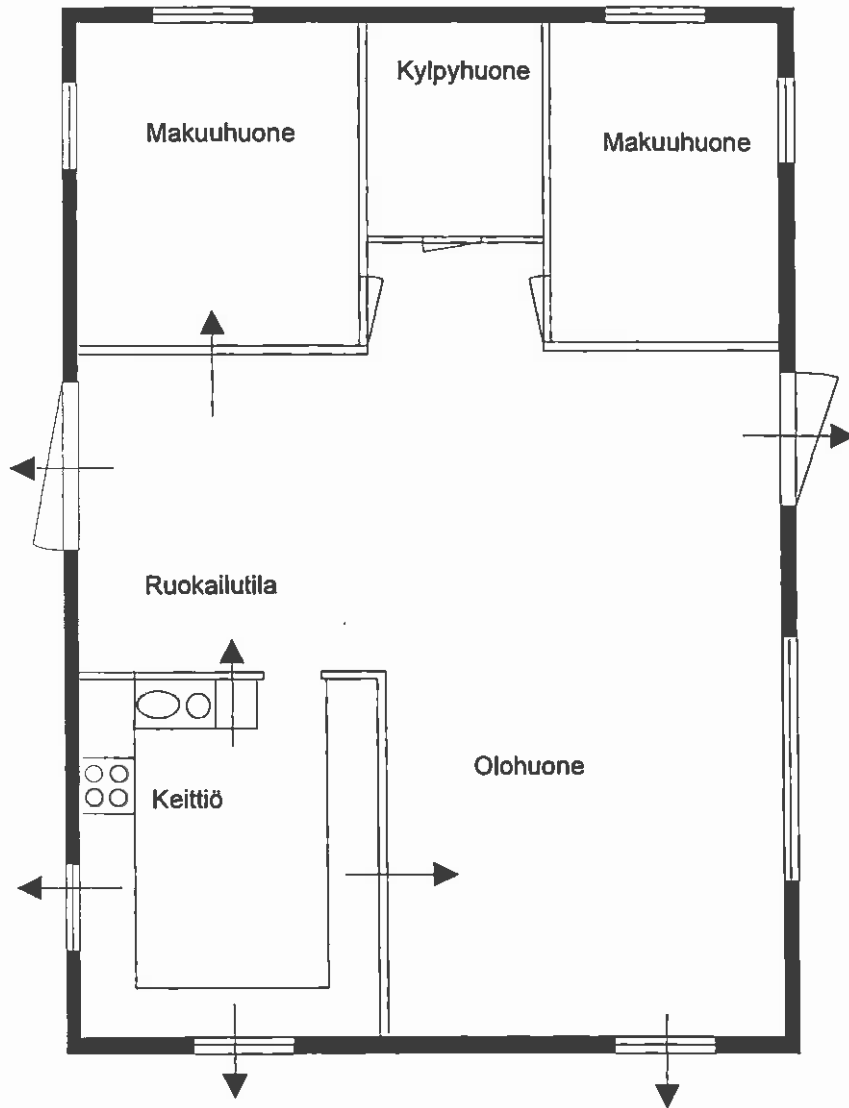
Räjähdyksen kulkua ja suhteellista voimaa osoittavat palojäännökset tunnistetaan, valokuvataan ja kirjataan. Palojälkien perusteella arvioidaan eri osiin kohdistunut suhteellinen räjähdyspaine. Erilaisten räjähdyksessä sinkoutuneiden palojäännösten, kuten ikkunalasin, etäisyydet ja suunnat dokumentoidaan. Suuremmat, massiivisemmat kappaleet mitataan ja punnitaan niihin vaikuttaneiden voimien arvioimiseksi.

Lopulliseen piirroksen räjähdyspaikasta merkitään kaikki oleelliset havainnot siten, että esineiden siirtymä, sen suunta ja vaurion aste selviävät (kuva 9.6). Lisäksi merkitään, jos mahdollista, vaurion aiheuttanut suhteellinen paine.

Tämän tiedon perusteella haetaan räjähdysalkukohta siirtymällä vähiten vaurioituneista kohdista eniten vaurioituneisiin kohtiin ottaen huomioon vaurioiden vaihtelut. Tämä perustuu yleiseen oletukseen, että räjähdys aiheuttamat siirtymät räjähdysalkukohdasta pois päin noudattavat karkeasti pallosymmetriaa ja että räjähdysvoima heikkenee, kun etäisyys räjähdysalkukohdasta kasvaa.

Usein on hyödyllistä piirtää useampi piirros, suurempaa aluetta kuvaava karkeampi piirros, josta rajoitetaan tarkemmin tutkittava alue, sekä tätä kuvaava tarkempi piirros. Tämä menettely on erityisen hyödyllinen räjähdyskeskuksia muodostavissa räjähdyksissä. Muissa tapauksissa, esimerkiksi haihtuvien polttoainekaasu- tai -höyryräjähdyksissä, räjähdysalkukohta on joskus osoitettavissa vain huoneen tai tietyn alueen tarkkuudella.

Tilanne on monimutkaisempi, jos on tapahtunut sarja räjähdysalkukohtia ja jokaisella on oma alkukohta. Eri huoneiden vauriot tutkitaan silloin erikseen ja niitä vertaillaan keskenään. Painevauriot naapurihuoneessa ei kuitenkaan välttämättä osoita, että huoneessa on ollut räjähdyskykyinen seos ennen räjähdystä, koska painevaikutukset ovat voineet siirtyä alkuperäisestä syttymiskohdasta muualle. Jos ensimmäinen, voimakas räjähdys on rikkonut rakenteita siten, että syntyy aukkoja ympäristöön, niin seuraavat räjähdykset saattavat olla vaikutuksiltaan heikompia, koska paine pääsee purkautumaan ensimmäisen räjähdysalkukohtien aukoista. Vaurioiden ja niitä aiheuttaneiden paineiden vertailu saattaa silloin osoittaa, missä ensimmäinen räjähdys on tapahtunut. Tämä pitää vain paikkansa, jos ensimmäinen räjähdys todella on ollut voimakkaampi kuin seuraavat. Esimerkiksi pölyräjähdykset poikkeavat usein tästä. Pölyräjähdysten sarjassa jatkoräjähdykset ovat lähes aina voimakkaammat kuin ensimmäinen. Tämä johtuu siitä, että ensimmäinen räjähdys aiheuttaa huomattavaa turbulenssia ja sekoittaa enemmän pölyä seuraavia räjähdysalkukohtia varten.



Kuva 9.6. Esimerkki räjähdysen jälkeä kuvaavasta piirroksesta. Nuolet osoittavat seinien, ovien ja ikkunoiden siirtymissuuntia. Kuvaa täydennetään luettelemalla vaurioiden laatua ja kappaleiden siirtymiä. NFPA 921 (1995) mukaan.

9.5.4.2 POLTTOAINE

Räjähdyksen syttymiskohdan selvittämisen jälkeen selvitetään räjähdysen polttoaine, sen laatu, määrä, pitoisuus ja jakauma räjähdystä edeltäneessä tilassa. Verrataan räjähdysen jälkien laatua ja laajuutta tunnettuihin paikalla olleiden polttoaineiden aiheuttamien räjähdysten tunnusmerkkeihin (taulukko 9.2). Negatiivisen näytön saamiseksi vaaditaan suurta huolellisuutta ja kaikkien mahdollisten vaihtoehtojen ottamista huomioon.

Palojäännösten, noen, pölyn tai ilmanäytteiden kemiallinen analyysi voi selvittää polttoaineen laadun (vertaa kohdat 3.6.1 ja 4.5).

Kun polttoaineen laatu on tiedossa, etsitään, mistä se on tullut. Jos esimerkiksi polttoaineeksi on havaittu ilmaa kevyempi kaasu ja rakennuksessa on maakaasuputkisto, etsitään vuotokohta. Tämä on usein räjähdysen alkukohdan läheisyydessä tai sen alapuolella kuten kaasuputkiston vuoto tai viallinen kaasua käyttävä laite. Vuotokohdan lähellä on usein paikallinen palojälki, joka on syntynyt, kun vuotanut kaasu on palanut soihduna vuotokohdassa.

Mikäli mahdollista, käydään läpi kaikki kaasuputkistoon liittyvät putket, liitokset ja laitteet.

Jos kyseessä on nestekaasu tai muu hajustettu polttoaine, hajusteiden tunnistaminen voi edistää tutkimuksia.

9.5.5 Syttymissyy

Kun syttymiskohta ja polttoaine on tiedossa, jäljelle jää syttymislähde ja -syy. Tämä on usein räjähdysen tutkimuksen vaikein osa, koska erityisesti kaasuräjähdysten tapauksissa, mahdollisia syitä voi olla montakin, ja selvittäminen edellyttää, että kaikki vaihtoehdot käydään huolellisesti läpi.

Muun muassa seuraavat asiat selvitetään:

- a) polttoaineen minimisyttymisenergia
- b) mahdollisen syttymislähteen energia
- c) polttoaineen itsesyttymislämpötila
- d) mahdollisen syttymislähteen lämpötila
- e) syttymislähteen sijainti polttoaineeseen nähden
- f) oliko sekä polttoainetta että syttymislähde samanaikaisesti paikalla
- g) mahdollisten silminnäkijöiden havainnot paikan tilasta ja siinä tehdyistä toimenpiteistä ennen räjähdystä ja sen jälkeen.

Lopuksi selvitetään, miten polttoaine ja syttymislähde osuivat yhteen syttymiskohdassa. Silloin räjähdysen syy on selvitetty.

10. MAASTOPALOT

10.1 YLEISTÄ

Maastopaloissa palava aine on pääasiallisesti alueen kasvillisuutta, mutta voi myös käsittää rakennuksia, kulkuneuvoja ym. jos palo leviää asutuille alueille. Maastopalot ovat usein erittäin laajoja, niiden sammuttaminen on hyvin työlästä ja palon aiheuttamat vahingot voivat olla erittäin huomattavat.

Esimerkkinä tuhoisasta maastopaloista esitetään tässä Oakland Hillsin maastopalo Kaliforniassa, Yhdysvalloissa 20.10.1991 (Steckler et al. 1991, Pagni 1993). Palo sai alkunsa edellisenä päivänä tapahtuneesta 2 ha:n pensaspalon uudelleensyttymisestä kun voimistunut tuuli lennätti uutta palavaa materiaalia palaneelle alueelle ja uusia paikallisia paloja syttyi. Puolesta tunnissa palo oli laajennut 5,5 ha:n alueelle. Tämän jälkeen palo kasvoi erittäin nopeasti, 15 minuuttia myöhemmin palon laajuus oli 150 ha, ja palon etenemisnopeus oli tämän 15 min:n aikana noin 2 m/s. Palo levisi esikaupunkialueelle, sen polttama alue 600 ha, palossa kuoli 25 ihmistä, palo tuhosi tai vaurioitti 2334 rakennusta ja rahalliset menetykset olivat noin miljardi US\$. Alueen kasvillisuus oli hyvin kuivaa pitkän kuivan kesän jälkeen, lisäksi oli palon syttymispaikan lähellä olevissa puissa paljon kuolleita lehtiä ja oksia edellisen joulukuun epätavallisten pakkasten takia, joten alueella oli paljon hyvin palavaa materiaalia. Paloa levitti kuiva, kuuma tuuli, jonka keskimääräinen voimakkuus oli noin 10 m/s. Esikaupunkialueella oli paljon kasvillisuutta rakennusten lähellä, mikä myös nopeutti palon etenemistä. Palo saatiin hallintaan vasta tuulen heikkenemisen jälkeen.

Edellä mainittu palo on ääripään esimerkki maastopalon rajuudesta. Leviämisnopeudet ovat tavallisesti selvästi alhaisemmat. Esimerkiksi mitatut palon etenemisnopeudet 10 ha:n metsäpalokokeessa (Simard ym. 1982) vaihtelivat 0,01 ... 1,1 m/s. Esimerkki osoittaa, että palon etenemisnopeus voi vaihdella huomattavasti.

Palon laajuudesta huolimatta se on kuitenkin lähes aina alkanut pienenä paikallisena palona, jossa on ollut sopivaa palavaa materiaalia palon levittämiseksi. Tähän kohtaan jää usein joku jälki syttymistapahtumasta paitsi tapauksissa, joissa syttymiseen käytetty väline on viety pois, esimerkiksi savukkeen sytytin.

Syttymiskohdan löytäminen on maastopaloissa ehkä vielä korostetummin palonsyyn selvittämisen edellytys kuin rakennuspaloissa. Palon laajuus ja kehitysnopeus riippuvat paljon ympäristötekijöistä, eikä palon kehittymisen arviointi välttämättä anna kovinkaan paljon tietoa syttymissyystä.

Valtaosa maastopaloista syttyy ihmisen toiminnan tuloksena. Luonnollisia syttymissyitä ovat salamanisku, itsesytyminen ja tulivuorenpurkaus, joista viimeistä ei esiinny Suomessa.

Maastopalot voidaan karkeasti jakaa neljään ryhmään: **palo pinnan alla, pintapalo, latvapalo ja paikalliset maastopalot**. Nämä eri muodot voivat tietysti esiintyä myös saman palon yhteydessä yhtä aikaa tai tietyllä viiveellä. Williams (1982) on tehnyt kaupunki- ja maastopalojen fysikaalisesta teoriasta kattavan katsauksen. Pitts (1991) on käsitellyt tuulen vaikutusta maastopaloihin sekä kerännyt laajan luettelon maastopalojen erikoiskirjallisuutta.

Varsinaista oppikirjaa tai muuta laajempaa esitystä maastopalojen teoriasta ei ole olemassa. Tarkempien tietojen hankkimiseksi on siis mentävä tutkijoiden yksittäisiin julkaisuihin.

Palo pinnan alla

Nämä palot etenevät pinnan alla tai aivan maan pinnan tasolla maatuneissa lehdissä, humuksessa (mullassa), turpeessa ja muussa orgaanisessa aineessa maaperässä. Palo etenee hyvin hitaasti kytemällä ja voi elää hyvin pitkään syvällä maan uumenissa. Esimerkkejä tällaisesta sitkeästä palosta ovat turvesuon palaminen ja kaatopaikkapalo.

Pintapalo

Pintapalossa palavat ruoho, pensaat, pienehköt puut ja pintakasvillisuus yleensä. Palo leviää nopeasti, erityisesti, jos tuulee ja jos kasvillisuus on runsasta ja kuivaa. Palo on paikallisesti intensiivinen, mutta kestoaltaan lyhyt, koska aluskasvillisuus palaa nopeasti pois.

Latvapalo

Latvapalossa metsäpalo etenee puiden latvustossa, usein nopeasti. Latvapalo voi tuottaa riittävästi lämpöä, jotta se pystyy itse ylläpitämään itseään tai se voi olla riippuvainen samanaikaisesta pintapalosta.

Paikalliset maastopalot

Paikalliset palot syttyvät tuulen kuljettamista kipinöistä tai palavista kappaleista ja kekäleistä varsinaisen maastopalon ulkopuolella. Tällainen voi yhtyä isoon maastopalon tai jäädä paikalliseksi. Paikallinen palo voi myös syttyä rinnettä alas vierivästä palavasta kappaleesta tai vesistön kuljettamasta palavasta puusta. Nämä voivat syttyä huomattavan matkan päästä varsinaisesta maastopalosta ja aiheuttaa sammutusmiehistön ja -kaluston loukkuun jäämistä. Paikallisia maastopaloja voidaan joskus tulkita tahallaan sytytetyksi "useamman palopesäkkeen säännön" mukaan, vaikka ne olisivat syttyneet luonnollisella tavalla.

10.2 MAASTOPALON KULKUUN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Sääolosuhteet ovat tärkeä tekijä maastopalon kulun arvioimiseksi. Tuulen suunta ja nopeus, polttoaineen (kasvillisuuden) laatu ja määrä, kosteus ja lämpötila on otettava huomioon kun selvitetään maastopalon leviämissuuntaa ja syitä, minkä takia palo levisi tiettyyn suuntaan. Palon eteneminen riippuu sekä säteilylämmönsiirrosta että lämmön kuljettumisesta tuulen mukana.

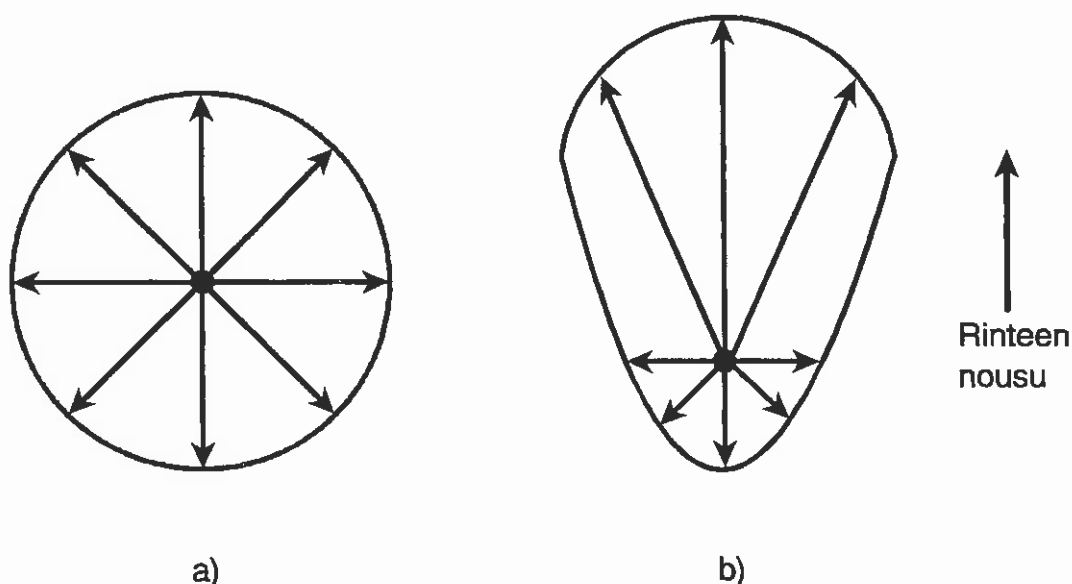
Metsäpalo voi olla niin voimakas, että se itse vaikuttaa tuulen suuntaan ja nopeuteen. Palon aiheuttama ilman kuumentuminen ja nouseminen ylöspäin (palopatsas) synnyttää huomattavia ilmavirtauksia palon reuna-alueilla, kun palo on riittävän suuri.

Tuuli voi kuljettaa huomattavia matkoja isojakin palavia kappaleita, jotka sytyttävät paikallisia maastopaloja. Palopatsas nostaa palavia lehtiä, oksia ym. korkealle ilmaan levittäen niitä kauas maastopalon ulkopuolelle. Nämä paikalliset maastopalot voivat joko kasvaa itsenäisinä paloina tai yhtyä paloon, josta palavat kappaleet ovat peräisin.

Maaston muoto on myös oleellinen tekijä. Esimerkiksi vesistöt, maantiet, paljaat ja kasvillisuudesta raivatut alueet, louhikot ja sekä maaston merkittävät korkeuserot vaikuttavat maastopalon leviämiseen.

Maastopalon sammutustyössä estetään palon eteneminen paitsi varsinaisella sammuttamisella myös poistamalla palava materiaali palon etenemissuunnassa erilaisilla työkaluilla käyttäen vesistöjä ja maastoesteitä hyväksi.

Jos maastopalo alkaa tasaisella maalla tyynellä säällä, se leviää ympyränmuotoisesti joka suuntaan edellyttäen, että siellä on riittävästi palavaa materiaalia palon ylläpitämiseksi. Tällainen palo etenee yleensä melko hitaasti. Jos palo alkaa rinteessä, niin palo leviää nopeammin rinteä ylöspäin nosteen vaikutuksesta ja syntynyt kuvio on viuhkamainen (kuva 10.1). Jos palopaikalla tuulee, niin edellä mainitut ympyrän tai viuhkan muotoiset kuviot venyvät tuulen suuntaan.



Kuva 10.1. a) Tyypillinen palon leviäminen tasaisella maalla tyynellä säällä, ja b) palon leviäminen tyvenellä rinteessä, kun polttoaine on tasaisesti jakautunut.

Maastopalon leviyttyä laajalle palaminen voi edetä lähes mihin suuntaan tahansa, riippuen polttoaineesta, maastosta, tuulesta ja palon aiheuttamista ilmavirtauksista. Palo saattaa kääntyä ja kulkea syttymiskohdan yli yhden tai useamman kerran.

10.3 MAASTOPALON TUTKIMINEN

10.3.1 Yleistä

Maastopalon selvittäminen seuraa samaa peruskaavaa kuin rakennuspalot: ensiksi selvitetään syttymisalue, sen jälkeen siellä oleva polttoaine, syttymislähde sekä miten polttoaine syttyi. Syttymisalueen määrittämisessä silminnäkijöiden havainnot ovat ensisijaisen tärkeitä, erityisesti kun palanut alue on laaja, jotta tarkemmin tutkittava alue saataisiin mahdollisimman pieneksi.

Syttymisalueen määrittämistä varten silminnäkijöiden haastattelu on tehtävä mahdollisimman nopeasti palon jälkeen. Haastatellaan sammuttamiseen osallistuneita, paikalla ennen paloa liikkuneita, metsänhoidosta vastaavia ym. ihmisiä. Ilmatieteen laitokselta pyydetään tietoa sääolosuhteista palon aikana sekä muutamaa vuorokautta ennen palon syttymistä. Kiinnitetään erityisesti huomiota ukkosilman esiintymiseen ja mahdolliseen salamointiin, lähiaikojen sademääriin ja maaston kosteuspitoisuuteen. Paikalliset sääolosuhteet palon aikana tarkistetaan esim. palokunnalta.

Palaneelta alueelta voi löytyä jälkiä, jotka antavat viitteitä palon kulkusuunnasta. Jos tällaisia jälkiä on riittävästi, niiden muodostamaa kuviota voidaan käyttää syttymisalueen jäljittämiseksi. Koska palotapahtuma on hyvin monimuotoinen ja muuntuu sään, maaston ja sammutustyön mukaan, yksittäiset havainnot voivat olla suorastaan harhaanjohtavia ja palamisjälkien kuvio on tarkastettava kokonaisuutena eikä yksittäisten pisteiden perusteella. Esimerkiksi palokatujen raivaaminen tai ilmasta pudotetut sammutusaineet, jotka viilentävät aluetta osittain, voivat vääristää palojälkiä.

Suuren maastopalon syttymiskohdan ja leviämisen seurannan työväline ovat myös ilmasta lentokoneesta varta vasten otetut valokuvat tai sitten kaukokartoitussatelliittien kuvat. Satelliittikuvia on saatavissa esimerkiksi Maanmittauslaitoksen satelliittikuvakeskuksesta tietoverkkojen välityksellä. Ajantasalla olevat tiedot hintoineen löytyvät Maanmittauslaitoksen WWW-sivuilta. Kuvien erotuskyky vaihtelee 100 m LRI-kuvasta (tiedoston koko alle 100 kilotavua) SAR Full Resolution-kuvien 20 x 16 m (tiedosto 63 megatavua). Yleisimmät kaukokartoitussatelliitit, joiden kuvia välitetään, ovat: yhdysvaltalainen Landsat, ranskalainen SPOT, intialainen IRS, venäläinen RESURS, yhteiseurooppalainen tutkasatelliitti ERS, japanilainen JERS, kanadalainen tutkasatelliitti RADARSAT, yhdysvaltalaisen NOAA/AVHRR, venäläisten KVR-1000, KFA-1000, TK-350, MK-4.

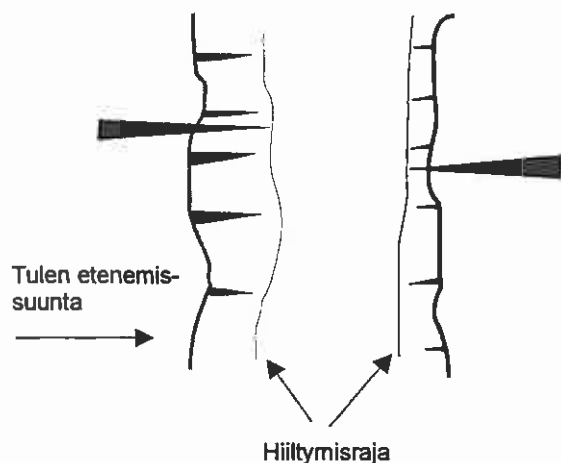
10.3.2 Toiminta palopaikalla ja leviämisjäljet

Palaneen alueen tarkastelu aloitetaan reunoilta ja käydään alue systemaattisesti läpi. Tehdyt havainnot merkitään käsivaraiseen piirroksen tai peruskartan lehdelle. Alue eristetään tutkimuksien ajaksi. Palopaikalle on mentävä mahdollisimman pian palon jälkeen, koska tuuli, sateet, eläimet ja mahdolliset sammutuksen jälkiraivaukset voivat hävittää jäljelle jääneitä merkkejä palon syttymissyystä. On kuitenkin muistettava työturvallisuus, esimerkiksi maahan jäänyt kytöpalo saattaa arvaamatta leimahtaa uudestaan.

Silminnäkijöiden ja havaintojen perusteella ei yleensä voida rajata syttymisaluetta tiettyyn pisteeseen, vaan alueeksi jää vähintäänkin joidenkin neliömetrien suuruinen ala.

Seuraava luettelo sisältää muutamia palamissuuntaa osoittavia jälkiä (DeHaan 1991):

1. Hiiltyminen puun rungossa, aidassa ym. on syvempi saapuvaan palorintamaan päin olleella puolella (kuva 10.2). Hiiltymissyvyys voidaan tarkistaa kuten kohdassa 4.1.3 on esitetty. Hiiltymissyvyys on suhteellinen mitta ja absoluuttisesta hiiltymissyvyydestä ei voida tehdä kovinkaan pitkälle meneviä johtopäätöksiä.

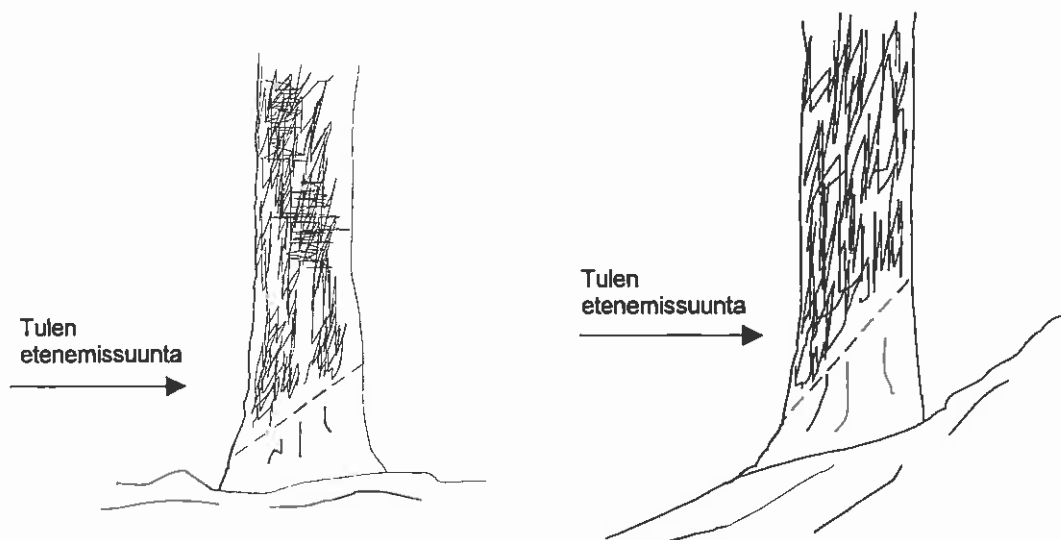


Kuva. 10.2. Yhtenäisen polttoaineen hiiltymissyvyys on suurempi palon puolella (DeHaanin (1991) mukaan).

2. Palovauriot puissa ja pensaissa ovat yleensä laajemmat palorintaman saapumispuolella.

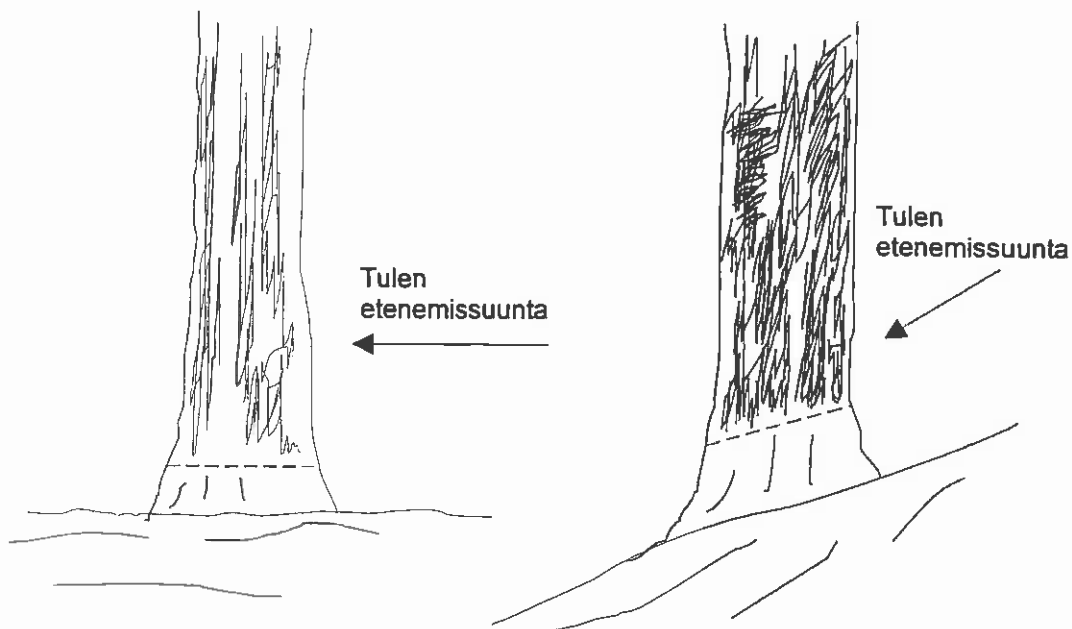
3. Nopeasti etenevä palo voi muotoilla puiden jäljelle jääneitä oksia siten, että palorintaman saapumispuolella olevien kärjet ovat tylppiä ja palorintaman menosuuntaan osoittavat ovat suippenevia.

4. Nopeasti etenevä palo aiheuttaa vedon, joka jättää nousevan jäljen puiden runkoihin ja muihin pystyssä oleviin kohteisiin (kuva 10.3).



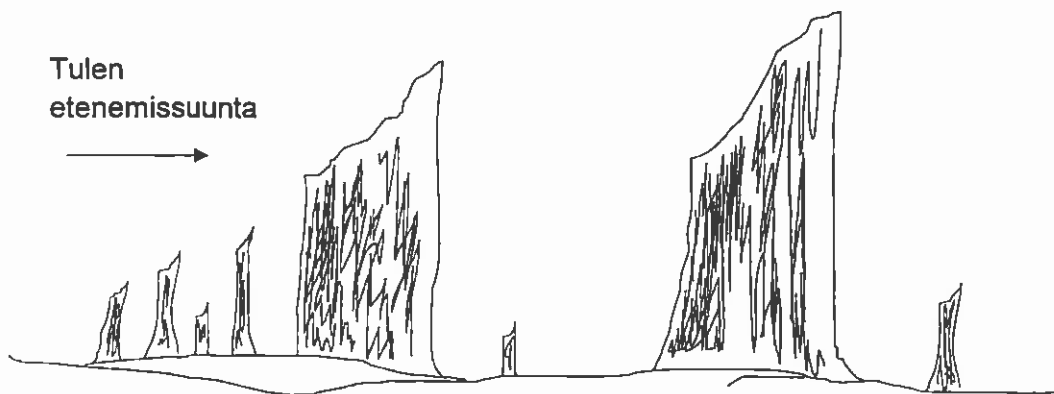
Kuva 10.3 Nopeasti etenevän tulen palojälki puun rungossa on matalampi palon tulosuunnan puolella (DeHaanin (1991) mukaan).

5. Hitaasti liikkuva palo, esimerkiksi vastatuuleen tai rinnettä alas liikkuva palo, jättää palojäljen joka on karkeasti yhdensuuntainen maan pinnan kanssa (kuva 10.4). Paikallinen palokuorma, kuten puiden lehdet, neulaset tai muu palava materiaali puun ympärillä voi vaikuttaa kohtien 4 ja 5 jälkiin.



Kuva 10.4 Hitaasti etenevän tulen palojälki puun rungossa on likimain yhdensuuntainen maan pinnan kanssa (DeHaanin (1991) mukaan).

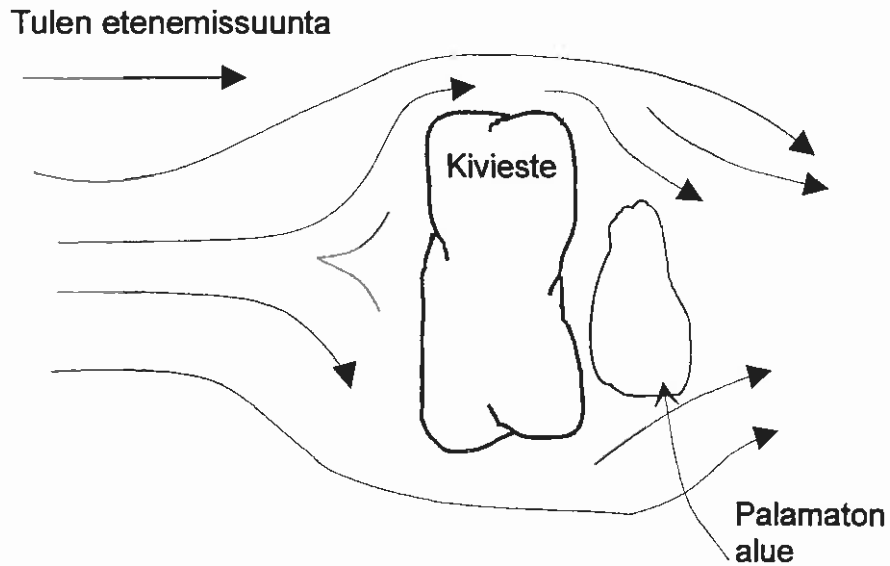
6. Pystysuoran poispalaneen rungon jäljelle jäävän tyngän poikkipinta on kalteva siten, että palorintaman menosuuntainen puoli on korkeampi (kuva 10.5). Jos pintaa silittää kädellä, pinta on “myötäkarvainen” palon etenemissuunnassa ja “vastakarvainen” päinvastaisessa suunnassa.



Kuva 10.5 Pystysuoran poispalaneen rungon tyngän poikkipinta on kalteva ja nousee palon etenemissuuntaan (DeHaanin (1991) mukaan).

7. Kivet ja muiden palamattomien kohteiden palorintaman puoleisissa osissa kuumenemisen jäljet ovat voimakkaammat kuin palon menosuunnassa. Sammal ja kiven lähellä kasvava ruoho voivat jäädä eloon palon jäljiltä.

8. Isot kivet, seinät ja muut isot kohteet estävät palon etenemistä ja suojanpuoleinen kasvillisuus voi jäädä vaurioitumatta (Kuva 10.6). Jos tuuli ja palon etenemissuunta kääntyy, nämäkin voivat tuhoutua.

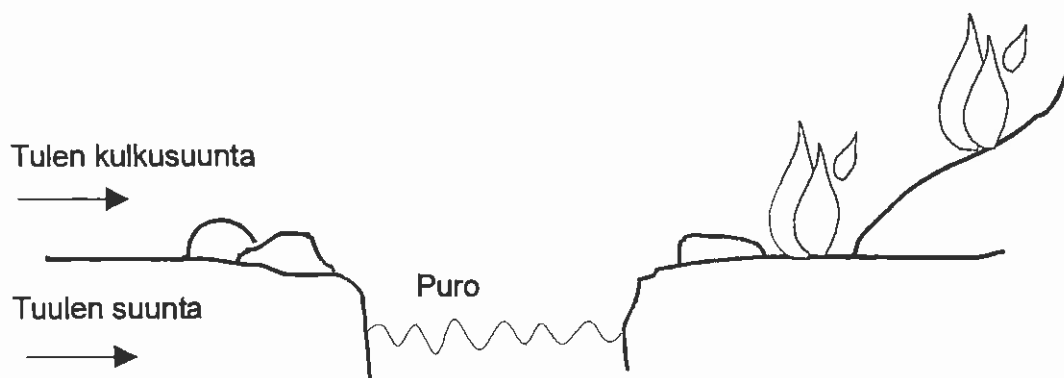


Kuva 10.6 Nopeasti etenevä palo saattaa jättää palamattoman alueen palamattoman esteen suojanpuolelle (DeHaanin (1991) mukaan).

9. Puiden ja ruohon jäljelle jäävien tynkien korkeus on karkeasti ottaen verrannollinen palon etenemisnopeuteen. Se riippuu myös kasvien kosteuspitoisuudesta ja, jos alue palaa moneen kertaan, vaikutus ei ole näkyvissä.

10. Syttymiskohdan välittömässä läheisyydessä palo ei ole kehittynyt tiettyyn suuntaan ja mahdolliset edellämäinitut jäljet voivat antaa ristiriitaisia osoituksia. Polttoaine, kuten pensaat tai ruoho, saattaa olla edelleen pystyssä tai vain osittain palanut. Puiden palovauriot saattavat rajoittaa tyviosaan.

11. Ilmavirtauksien kantamien palavien osien sytyttämät uudet maastopalot lisäävät syttymiskohtien lukumäärää. Tämä voi olla palon ainoa mahdollisuus levittää esteen, kuten joen tai tien yli (kuva 10.7).



Kuva 10.7 Ilmavirtaukset voivat lennättää palavia osia esteen yli ja levittää paloa. (DeHaanin (1991) mukaan).

12. Tuhka voi osoittaa tuulen suuntaa ja polttoaineen laatua ja määrää.

Alueen tarkastuksen jälkeen verrataan löydettyjen jälkien antamaa tietoa tunnettuihin palokuorman, maaston, sääolosuhteiden ja sammutustyön vaikutuksiin palon kulkuun. Selvitetään mahdollisia ristiriitaisia havaintoja. Selvitetään, onko palo koostunut paikallisista paloista, jotka ovat sulautuneet yhteen jättäen useita syttymiskohtia. Alue, missä jäljet näyttävät johtavan eri suuntaan, voi joskus olla syttymiskohta ja sitä tutkitaan yksityiskohtaisesti.

10.3.3 Maastopalon syttymissyitä

Syttymisalueen määrittämisen jälkeen selvitetään palon syttymisen syy. Tämä on toisinaan käytännössä mahdotonta koska syttymislähde tai siihen viittaavat jäljet ovat tuhoutuneet, mutta usein jää riittävästi jälkiä syttymissyyn selvittämiseksi.

Tavallisimpia syttymissyitä ovat

- sammuttamatta jääneet tai hallinnasta ryöstäytyneet retkeilijöiden, metsästäjien ja muiden ihmisten nuotiot.
- huolimaton tupakointi (savukkeet, tulitikut ym.)
- tuhopoltto
- puutarha- ym- jätteiden polttaminen.
- ajoneuvojen tuottamat kipinät, esimerkiksi radanvarsilla junista. Kipinät voivat olla peräisin esimerkiksi pakoputkista, hankaavista osista, tai ajoneuvossa olevien ihmisten heittämiä.
- kipinät tulipalosta tai savupiipusta
- lasten tulitikkuleikit
- kuuma tuhka, joka on tavallinen kaatopaikkapalon aiheuttaja
- laitteiden kuumat pinnat, esimerkiksi autojen katalysaattorit
- salamanisku
- voimajohdot, muuntajat ym. niihin liittyvät laitteet. Näihin kuuluvat muuntajien oikosulut ja vikatoiminnot, pudonneet johdot, johdoille kaatuneet puut ja irronneet oksat sekä linnut ja nisäkkäät, jotka voivat koskettaa virrallisia johtoja, oikosulkea niitä ja mahdollisesti itse syttyä tuleen.
- moottoriajoneuvojen ja lentokoneiden onnettomuudet
- itsesyttyminen
- ilotulitusvälineet

- tuliaseet, joista saattaa lähteä kipinöitä tai kuumaa ruutia kuivaan kasvillisuuteen.
- linssin muotoiset lasipalat tai koverot heijastavat pinnat, jotka pystyvät kokoamaan auringonsäteitä polttopisteeseen.
- säteilylämpö läheisestä palavasta rakennuksesta.

Ihmisten toimintaan liittyvien syiden selvittämiseksi etsitään palopaikasta jälkiä ihmisten liikkumisesta. Tässä hyödynnetään myös henkilöhaastatteluja. Nuotiopaikan voivat paljastaa esimerkiksi nuotioon käytetyt ympäriskivet, nuotion palojätteet tai maan pinnan ympäristöä syvempi hiiltymisen. Nuotiopaikan ääressä voi olla ruojätteitä, elintarvikepakkauksia, pulloja, jalanjälkiä ym. oleskelun jälkiä.

11. PALOKUOLEMAT

11.1 TILASTOJA

Tulipaloissa kuolee Suomessa hieman alle 100 henkilöä vuosittain. Kuvan 11.1 yläosassa on esitetty tulipaloissa sattuneet kuolemat vuosilta 1952 - 1994 Tilastokeskuksen julkaisemien tietojen perusteella esitettynä (Keski-Rahkonen 1997b). Kunkin vuoden havaintopisteen ympärille on piirretty jana, jonka pituus kumpaankin suuntaan pisteestä on yhden hajonnan suuruinen. Kuvan 11.1 alaosassa on esitetty vuotuinen todennäköisyys yhden henkilön menettää henkensä tulipalossa. Se on laskettu palokuolemien lukumäärästä jakamalla Suomen väestömäärällä. Virhejanat ovat edelleenkin yhden hajonnan suuruiset. Kuvasta nähdään, että ottamatta huomioon vuotuista 1 ... 2 hajonnan suuruista tilastollista satunnaisvaihtelua todennäköisyys menettää henkensä tulipalossa on vuodesta 1968 saakka pysynyt likimäärin vakiona: 19 henkeä miljoonasta vuodessa.

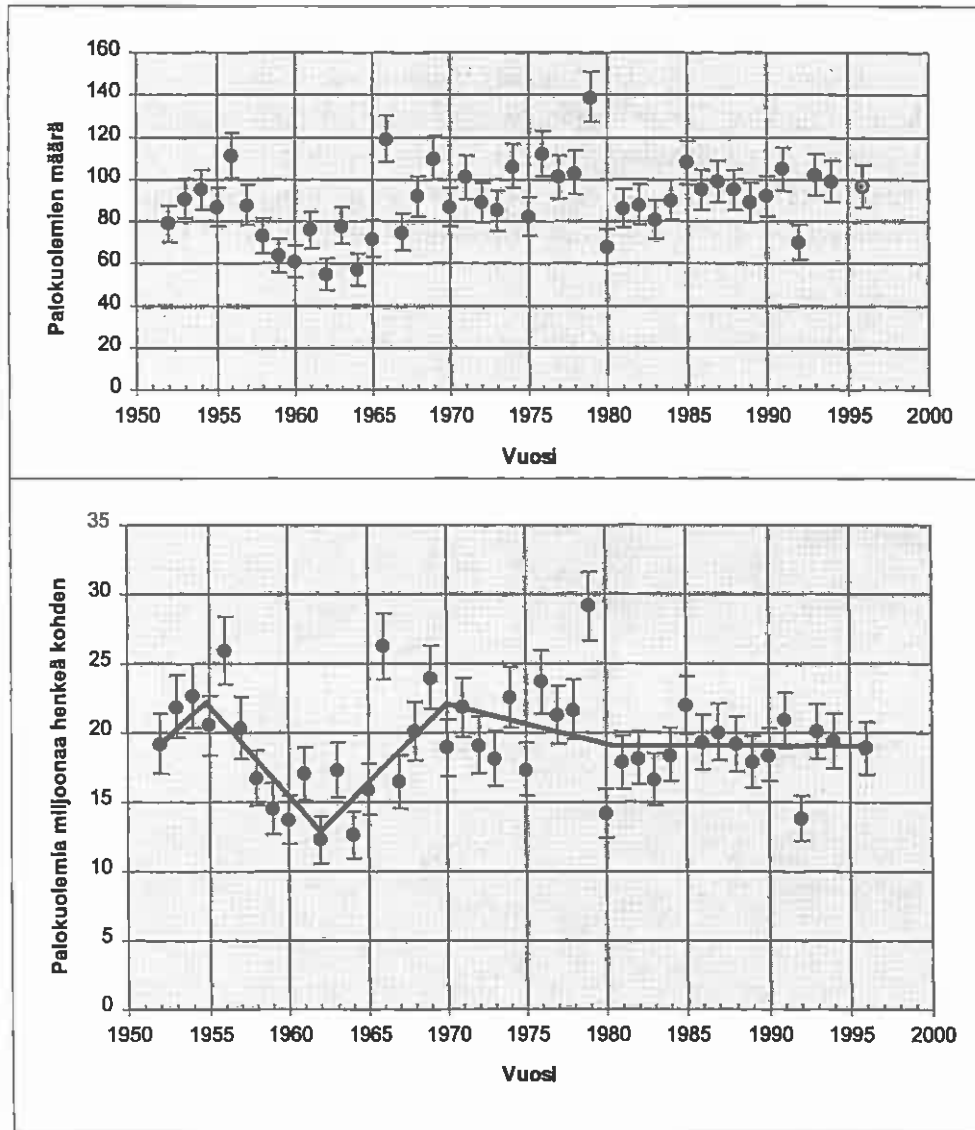
Suomessa menehtyy keskimäärin yksi henkilö 150 tulipaloa kohden. Moniuhriset palot ovat sitäkin harvinaisempia. Kuvassa 11.2 on esitetty palossa menehtyneiden uhrien määrä todennäköisyytenä kaikista palotapahtumista yhdessä palossa menehtyneiden uhrien lukumäärän mukaan Suomessa (1985-87) ja muutamissa muissa maissa (Keski-Rahkonen 1997a).

Kolmivuotiskautena 1985-1987 sattui 259 ihmisen kuolemaan johtanutta tulipaloa, ja niissä kuoli yhteensä 307 henkilöä. Näistä turmista Alanne ja Kulha tekivät yksityiskohtaisen selvityksen, josta Karlsson (1988) on julkaissut yhteenvedon.

Selvityksen keskeisimpiä havaintoja tulipaloissa kuolleista olivat:

- Valtaosa uhreista (79 %) oli miehiä.
- Palokohde oli useimmiten puurakenteinen omakotitalo (kuva 11.4).
- Talvikuukausina marras-maaliskuussa (lämmityskauden aikana) sattui 50 % enemmän palokuolemia kuin vuodessa keskimäärin.
- Viikonpäivistä lauantaina riski oli 50 % suurempi kuin keskimäärin, ja koko viikonlopun aikana (pe-su) sattui 20 % enemmän paloja kuin viikon keskimäärä edellyttäisi.
- Tupakointi oli yleisin syytymissyy (kuva 11.6).
- Yli puolet tapahtumista johtui omasta tai toisen varomattomuudesta.
- Joka neljäs uhreista löytyi sängystä (kuva 11.5).
- Vain joka neljäs oli yrittänyt pelastautua.
- Heti kuolleista uhreista 8 %:lla oli alkoholia 0,5-1,49 ‰ veressä ja hieman enemmän kuin joka toisella oli enemmän kuin 1,5 ‰ alkoholia veressä.

- Miesuhreista 88 % oli ollut humalassa mutta naisuhreista vain 12 %.
- ”Laitapuolen kulkijat” muodostivat vain pienen osan uhreista, esimerkiksi tilapäisasunnoissa sattui vain 13 kuolemaan johtanutta paloa (5%).

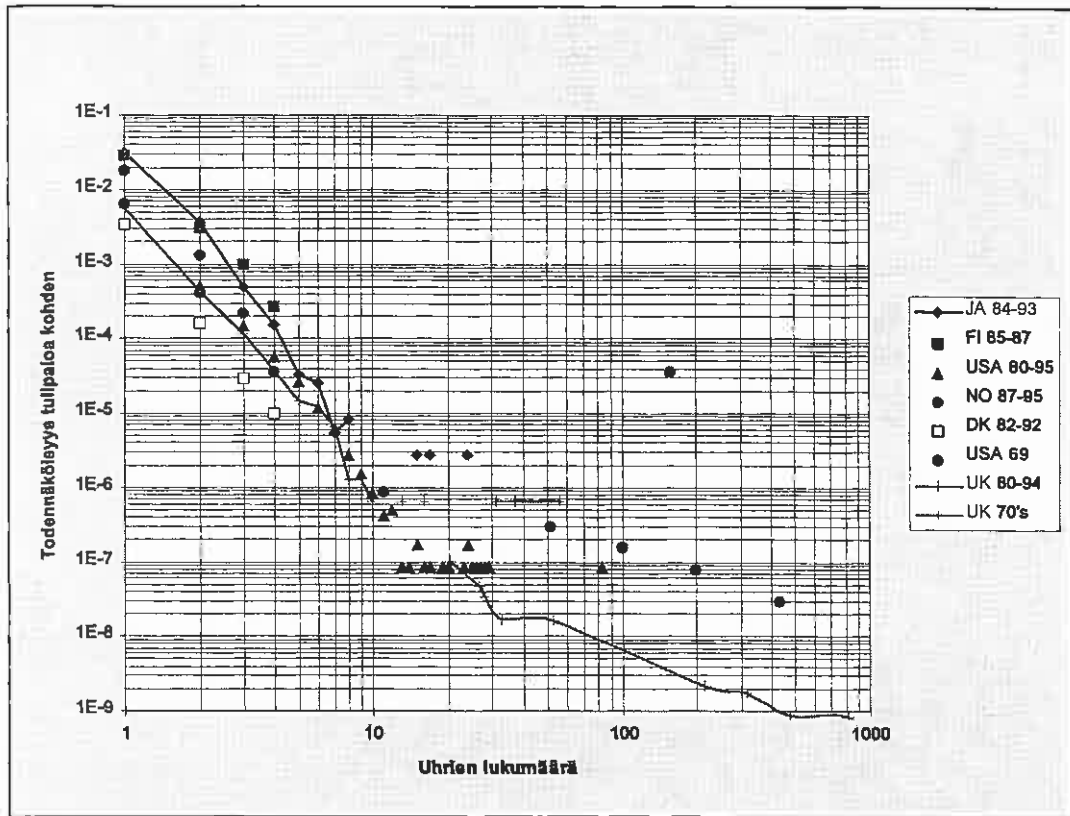


Kuva 11.1. Ylempi kuva: Tulipaloissa kuolleiden henkilöiden määrät Suomessa vuosina 1952 - 1996. Alempi kuva: Yhden henkilön vuotuinen todennäköisyys menettää henkensä tulipalossa. Pisteisiin liitettyt janat kuvaavat satunnaisvaihtelusta johtuvaa, yhden hajonnan suuruista virhettä. Alempaan kuvaan on piirretty käsivaraisesti pitkäaikaiskäyttötymistä kuvaava paksu viiva (Keski-Rahkonen 1997b).

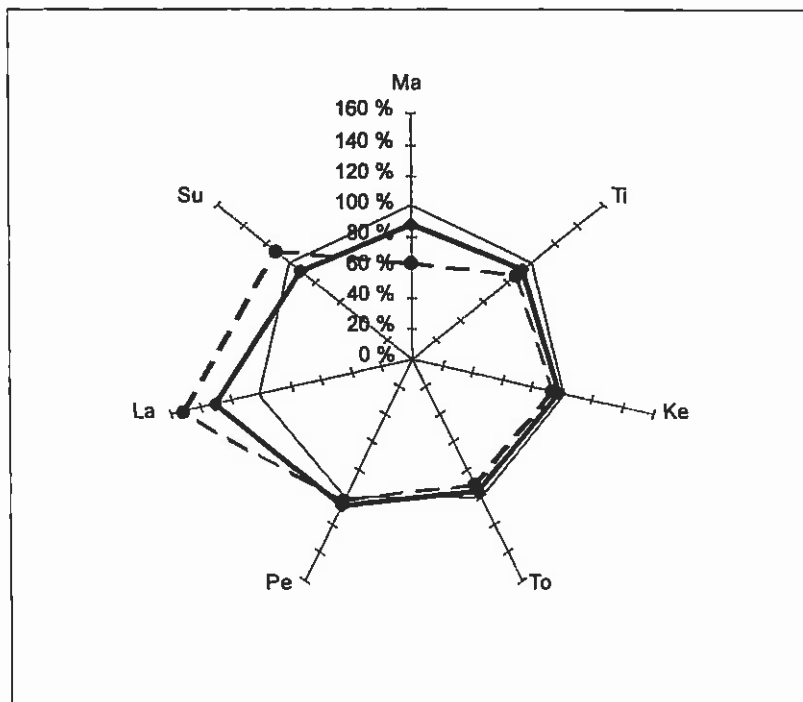
Kuvassa 11.3 on esitetty tulipalojen syttymien (palokunta tullut paikalle) suhteellinen osuus viikonpäivien mukaan jaoteltuna SM:n ONTIKA-tietokannasta poimittujen, vuosina 1994 - 1995 sattuneiden hälytysten perusteella (Rahikainen 1997). Samaan kuvaan on piirretty Alanteen ja Kulhan tutkimuksesta suhteelliset palokuolemien osuudet viikonpäivittäin. Palokuolemien määristä aiheutuva tilastovirhe on noin 15 prosenttiyksikköä. Siten havaittujen palokuolemien ja syttymien jakaumien välillä ei ole tilastollisesti merkittävää eroa.

Kuvassa 11.7 on esitetty palokuoleman todennäköisyydet sukupuolittain iän funktiona kahdesta maasta: Suomen osalta käyrät ovat keskiarvoja vuosilta 1982 - 84, 1992 - 93 ja 1996; Englannista on piirretty vuoden 1995 palokuolemiin perustuvat käyrät (Keski-Rahkonen 1997b). Kuvasta 11.7 näkyy, että Englannissakin miesten palokuolemien riski on kaikissa ikäryhmissä, vanhinta lukuunottamatta, 2 ... 3-kertainen naisten riskiin verrattuna. Suomessa miesten riski alkaa kasvaa kuitenkin heti aikuisiästä ja poikkeaa kaikista muista kuvan 11.7 käyristä merkittävästi korkeinta ikäryhmää lukuunottamatta. Kunkin käyrän korkeimman iän pisteet eivät ole kovin hyvin vertailukelpoisia, koska ryhmään kuuluvat Suomessa kaikki yli 65 vuotiaat ja Englannissa yli 80-vuotiaat. Erilaisen ikärajan sekä kunkin neljän ryhmän erilaisen ikäjakauman vuoksi tulokset näiden viimeisten pisteiden osalta ovat vain suuntaa antavia.

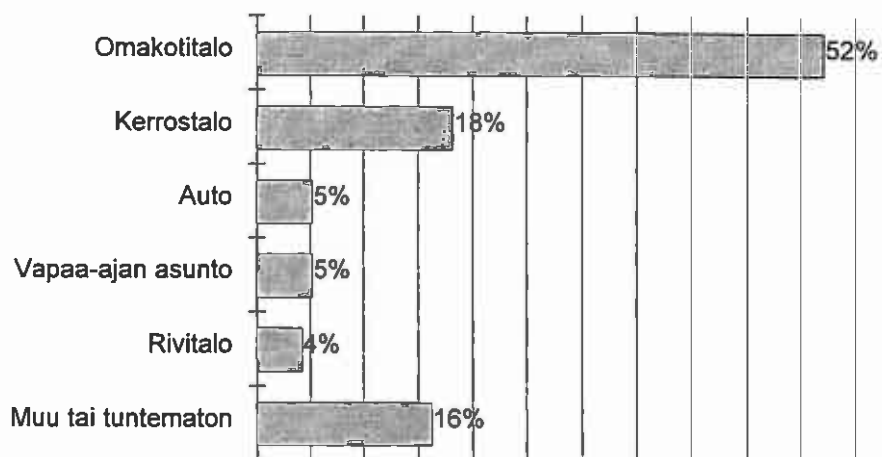
Tämän selvityksen valossa tyypillisin tulipaloon kuollut henkilö on noin 50-vuotias yksin asuva mies, joka kuolee viikonloppuna humalassa puurakenteisessa omakotitalossa tupakasta syttyneessä tulipalossa.



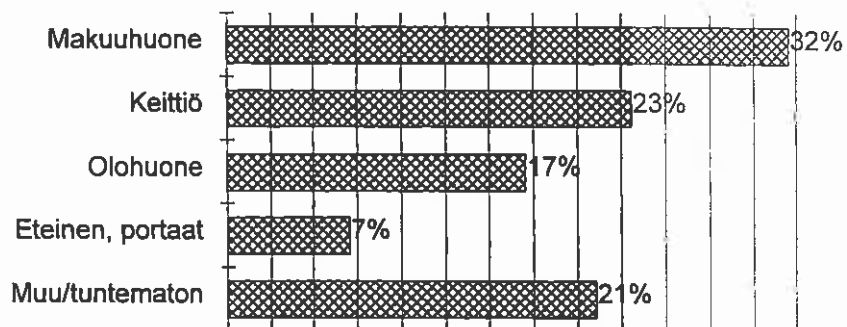
Kuva 11.2. Palossa menehtyvien uhrien määrä todennäköisyytenä kaikista palotapahtumista yhdessä palossa menehtyneiden uhrien lukumäärän mukaan Suomessa (1985-87) ja muutamissa muissa maissa (Keski-Rahkonen 1997a).



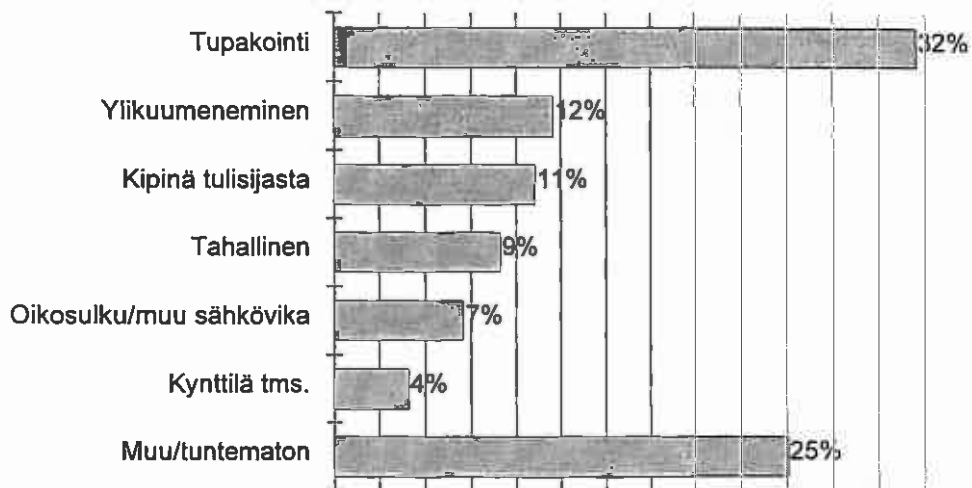
Kuva 11.3. Tulipalon syttymien suhteellinen osuus viikonpäivien mukaan jaoteltuna (paksu yhtenäinen viiva) verrattuna keskimääräiseen osuuteen (100%, ohut yhtenäinen viiva) sekä palokuolemien suhteelliseen jakaumaan (katkoviiva).



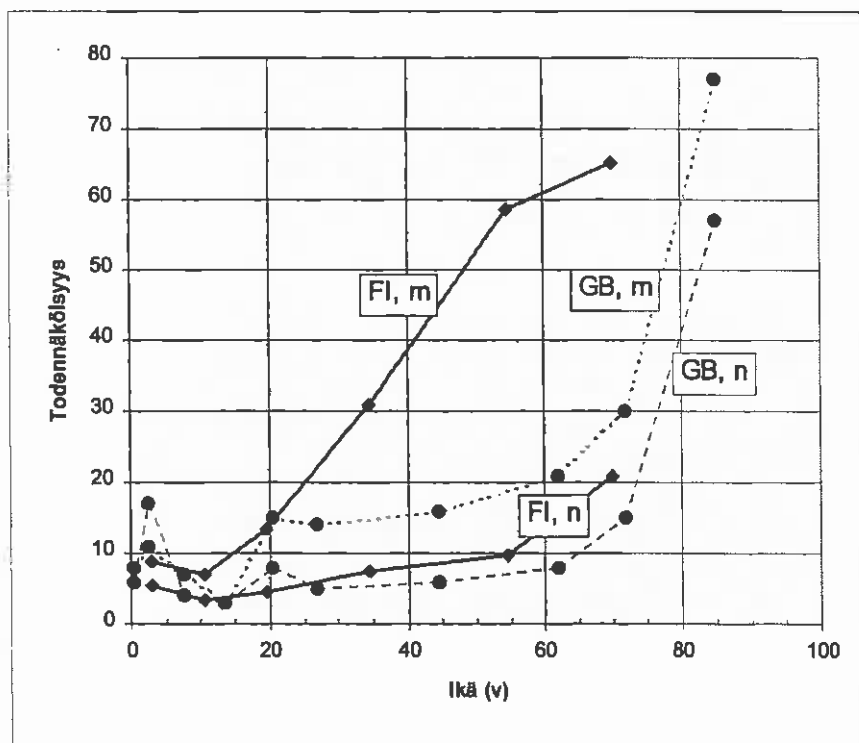
Kuva 11.4. Rakennustyyppi kuolemaan johtaneissa 259 tulipaloissa Suomessa vuosina 1985 - 1987.



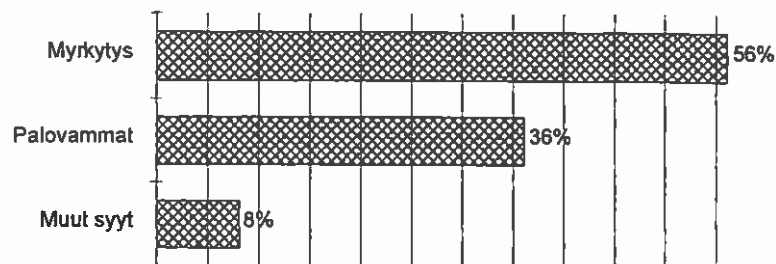
Kuva 11.5. Tulipalon syttymiskohta kuolemaan johtaneissa 259 tulipaloissa Suomessa vuosina 1985 -1987.



Kuva 11.6. Syttymissyys kuolemaan johtaneissa 259 tulipaloissa Suomessa vuosina 1985 - 1987, suhteelliset osuudet kaikista 307 kuolemantapauksista. Syttymissyys selvisi varmuudella 38 % tapauksista, 43 % jäi oletuksen asteelle ja loput jäivät tuntemattomiksi.



Kuva 11.7. Eri sukupuolten (m,n) palokuolemien todennäköisyys miljoonaa henkilöä kohden ikäryhmittäin Suomessa (FI) ja Englannissa (GB) (Keski-Rahkonen 1997b).



Kuva 11.8. Henkilöiden kuolinsyyt kuolemaan johtaneissa 259 tulipaloissa Suomessa vuosina 1985 - 1987. Uhrien kokonaismäärä oli 307. Selvityksen myrkytysluvut poikkeavat muiden selvityksien tuloksista

11.2 KUOLINSYYT

Edellisessä luvussa kuolinsyyt tulipaloissa oli jaettu kolmeen ryhmään, myrkytyksiin, palovammoihin ja muihin syihin. Näistä myrkytys on selvästi johtava kuolinsyy tulipaloissa (kuva 11.8).

11.2.1 Myrkytys

Tavallisimmat myrkylliset palokaasut jaetaan kahteen ryhmään niiden vaikutusten perusteella: huumaavat (narkoottiset) ja ärsyttävät. Huumaavat kaasut vaikuttavat keskushermostoon aiheuttaen väsymystä, tajuttomuutta ja lopulta kuoleman, ellei uhria saada pelastetuksi.

Ärsyttävät kaasut vaikuttavat silmiin ja hengitysteihin. Altistuksen aikana selkeimmät oireet ovat silmien ja hengitysteiden yläosan voimakas ärsyntyminen, joskus myös keuhkojen. On epätavallista, että tämä johtaa kuolemaan altistuksen aikana, elleivät pitoisuudet ole hyvin korkeita. Vakavissa tapauksissa kaasujen keuhkoihin tunkeutuminen voi 6 ... 24 h kuluttua aiheuttaa keuhkotulehduksen ja hengitysvaikeuksia, jotka voivat johtaa kuolemaan.

Äkillisen altistuksen seurauksena haitallisten aineiden vaikutuksen voimakkuus riippuu pääasiassa niistä henkilön kehoon joutuneesta kokonaisannoksesta. Tämän lisäksi muutkin seikat kuten haitallisen aineen pitoisuus, vaikuttavat jonkin verran syntyvän haitan voimakkuuteen. Yksilölliset erot eri henkilöiden välillä ovat suuret.

Palavassa tilassa altistuksen voimakkuuteen eivät vaikuta pelkästään materiaalin ominaisuudet, ts. itse palossa syntyvän haitallisen aineen voimakkuus, vaan useat muutkin tekijät. Henkilön saama kokonaisannos riippuu ensi sijassa haitallisen aineen pitoisuudesta tilassa sekä altistusajasta. Haitallisen aineen pitoisuuteen taasen vaikuttavat palavan aineen määrä, palamisnopeus, tilan koko ja ilmanvaihto. Samoissa altistusolosuhteissa henkilön

kehoon siirtyvän haitallisen aineen määrä taas riippuu ihmisen iästä, koosta ja kunnosta, jotka myös aivan ilmeisesti vaikuttavat haitasta selviytymisen mahdollisuuksiin.

Myrkyllisten palamiskaasujen tutkimuksien perusteella on esitetty seuraavat yleiset johtopäätökset:

- Tulipalo sellaisenaan aiheuttaa myrkyllisten kaasujen muodostumisen, ja eri materiaalien välisten erojen merkitys on pieni verrattuna itse tulipalon vaikutukseen.
- Savun, lämmön ja CO:n aiheuttamat vaaralliset olosuhteet esiintyvät yleensä paljon ennen, kuin muiden tuotteiden (HCN, SO₂...) vaikutus on merkittävä.

Narkoottiset kaasut

Selvästi tärkein myrkyllisistä palamistuotteista on hiilimonoksidi CO (häkä), joka on väritön, hajuton, ilmaa kevyempi ja erittäin myrkyllinen kaasu. Hiilimonoksidi esiintyy käytännössä jokaisessa tulipalossa. Sen myrkyllisyys johtuu siitä, että se muodostaa veren hemoglobiinin kanssa kemiallisen yhdisteen, karboksihemoglobiinin, joka estää hapen sitoutumisen hemoglobiiniin. Verinäytteistä on todettu, että 30 - 40 % karboksihemoglobiinia veren kokonaishemoglobiinimäärästä riittää lamaanuttamaan uhrin ja 50 - 70 % karboksihemoglobiinia on riittävä aiheuttamaan kuoleman. Eri tutkimuksien mukaan 50...80 % tulipalokuolemista johtuu hiilimonoksidista.

Toinen tärkeä myrkyllinen palamistuote on HCN- eli syaanivetykaasu. Tämä kaasu saattaa esiintyä paloissa joissa on tyyppiä sisältäviä materiaaleja kuten akryyli, polyuretaanivaahto, melamiini tai villa, jotka yleensä esiintyvät ainakin jossain määrin rakennuspaloissa. Lamaanuttava annos veressä on 50 mol/l ja tappava annos on 100 mol/l.

Lisäksi alhaiset happipitoisuudet (alle 15 %) ja huomattavan korkeat hiilidioksidi- (CO₂) pitoisuudet (yli 5 %) voivat vaikuttaa narkoottisesti.

Ei ole kovin tarkkaa tietoa näiden kahden yleisimpien myrkykaasujen yhteisvaikutuksesta, kuten ei myöskään niiden yhteisvaikutuksesta alkoholin kanssa. Kuolonuhreista ei myöskään voida selvittää, mistä sydämen toimintahäiriö johtuu, myrkyllisistä palamistuotteista vai häneen kohdistetusta lämpörasituksesta.

Taulukossa 11.1 esitetään näiden narkoottisten kaasujen lamaanumiseen ja kuolemaan johtavia pitoisuuksia.

Taulukko 11.1 Lamaantumiseen tai kuolemaan 5 tai 30 min altistusaikana johtavat CO-, HCN- ja CO₂-pitoisuudet sekä alhaiset happipitoisuudet (tilavuus-%) (Purser 1995).

Kaasu	Lamaantuminen (5 min)	Kuolema (5 min)	Lamaantuminen (30 min)	Kuolema (30 min)
CO	6 ... 8	120 ... 160	1,4 ... 1,7	2,5 ... 4,0
HCN	0,15 ... 0,20	0,25 ... 0,40	0,09 ... 0,12	0,17 ... 0,23
CO ₂	70 ... 80	> 100	60 ... 70	> 90
O ₂	100 ... 130	< 50	120	60 ... 70

Ärsyttävät kaasut

Tärkeimmiksi palokaasuissa esiintyviksi ärsyttäviksi kaasuiksi katsotaan yleensä akroleiini CH₂=CH-CHO (tupakansavun hajun muodostava aine) ja kloorivety HCl, joiden ärsytyspitoisuuksia on esitetty taulukossa 11.2.

Akroleiinia muodostuu mm puun, rasvojen sekä maaöljytuotteiden paloissa.

Tavallinen kloorivedyn lähde tulipaloissa on polyvinyylidikloridi PVC, jota käytetään paljon putkistojen, lattiapäällysteiden, sähkökaapeleiden ja taloustavaroiden materiaalina. PVC:n palaessa muodostuu jo 150 °C lämpötilassa kloorivetyä HCl, joka veteen liuenneena muodostaa suolahappoa.

Taulukko 11.2. Akroleiinin ja kloorivedyn ärsytys- ja kuolemaan johtavat pitoisuudet (Purser 1995).

Kaasu	Ärsytys	Ärsytys	Kuolema	Kuolema
	melko vakava	vakava	5 min altistus	10 min altistus
Akroleiini (ppm)	1 ... 5	5 ... 95	500 ... 1000	50 ... 135
Kloorivety (%)	0,075 ... 0,3	0,3 ... 11	12 ... 16	2 ... 4

11.2.2 Altistuminen lämmölle

Altistuminen lämmölle voi johtaa lamaanantumiseen ja kuolemaan pääsääntöisesti kolmella tavalla: lämpöhalvauksena (hyperthermia), ihon palovammoina ja hengitysteiden palovammoina.

Lämpöhalvaus

Henkilö, joka on kuumassa ympäristössä, voi saada lämpöhalvauksen erityisesti, jos ilman kosteus on korkea ja jos henkilö on aktiivinen. Halvaukseen johtava altistusaika riippuu ensisijaisesti henkilöön vaikuttavan lämpösäteilyn kokonaisannoksesta, toissijaisesti lämpövirran tiheydestä, ja näitä heikommin henkilön vaatetuksen määrästä ja laadusta sekä kuinka rasittavaa työtä henkilö on tekemässä.

Oleskelu kuumassa ympäristössä, jossa ilman lämpötila ei ole riittävän korkea aiheuttamaan palovammoja, lämpöhalvaus voi esiintyä noin 15 min:n oleskelun jälkeen. Sellaisissa olosuhteissa, joissa kuivan ilman lämpötila on alle 120 °C tai kylläisen ilman lämpötila alle 80 °C, tärkein seuraus on kehon lämpötilan asteittainen nousu. Noin 40 °C:n kehon lämpötilassa taju hämärtyy ja uhri on vakavasti sairas. Lämpötilan nousu edelleen aiheuttaa peruuttamattomia vaurioita ja yli 42,5 °C:n uhri menehtyy muutamassa minuutissa ilman apua (Purser 1995).

Yli 120 °C:n lämpötiloissa aika vaurioihin on lyhyempi ja henkilö saa lisäksi palovammoja. Henkilö kuolee todennäköisesti altistuksen aikana tai heti sen jälkeen pääasiallisesti lämpöhalvaukseen. Jos henkilö ei kuole lämpöhalvaukseen, hän saattaa myöhemmin menehtyä hengitysteiden palovammojen takia tai ihon palovammojen jälkiseurauksiin.

Ihon palovammat

Kivun lisäksi sekä palovammojen aiheuttama psykologinen sokki ja pelko että fysiologinen sokki vaikuttavat ihmisen toimivuuteen ja liikkuvuuteen. Verenkierron häiriö ja laskenut verenpaine voivat johtaa voimien menetykseen ja tajuttomuuteen. Palovammojen suoranainen vaikutus ja myöhemmän toipumisen mahdollisuus riippuvat useasta tekijästä kuten palovamman sijainnista ja pinta-alasta, syvyydestä, uhrin iästä ja hoidon laadusta. Nuorilla aikuisilla on yleensä parhaat mahdollisuudet selviytyä, kun taas lapsilla ja vanhuksilla on huonoimmat mahdollisuudet.

Jos uhri selviytyy ensimmäisestä sokista, hän voi menehtyä muutaman viikon aikana palovammojen aivoille, sydämelle, keuhkoihin, maksalle tai munuaisille aiheuttamiin jälkiseurauksiin.

Hengitysteiden palovammat

Hengitysteissä ei esiinny lämmön aiheuttamia palovammoja, ellei kasvoissa ole ihon palovammoja. Hengitysteiden palovammojen laajuus riippuu huomattavasti kuumien kaasujen kosteudesta. Kuiva kaasu aiheuttaa palovammoja hengitysteiden yläosassa kun 100 °C:n vesihöyry voi aiheuttaa vakavia palovammoja keuhkojen alaosaan saakka. Kuumien kaasujen aiheuttamia palovammoja hengitysteissä on vaikea erottaa ärsyttävien kaasujen tai ihon palovammojen jälkiseurauksien aiheuttamista vaurioista.

11.2.3 Muut syyt

Valtaosalla tulipaloista löydetyistä vainajista kuolinsyy on joku edellä mainituista. Muita suoraan tulipaloon liittyviä syitä ovat sortuvien rakenteiden tai räjähdysten paineaallon aiheuttamat vahingot. Räjähdysten yhteydessä on huomattava, että paineaalto on mahdollisesti siirtänyt ruumista sen alkuperäiseltä paikalta.

Palosta löytyneen uhrin kuolinsyynä murhan tai tapon mahdollisuus on periaatteessa aina olemassa. Tulipaloa on silloin käytetty ruumiin hävittämistarkoituksessa.

Itsemurha sytyttämällä tulipalo ei ole kovinkaan epätavallinen tapahtuma (vertaa kohta 5.7.2.2). Kyseessä on usein mieleltään häiriintynyt ihminen. Varsinainen kuolinsyy saattaa olla hiilimonoksidimyrkytys, joka on seuraus henkilön sytyttämästä tulipalosta, usein pienehkössä suljetussa huoneessa. Jos huone on tiiviisti suljettu, palo saattaa sammua itsestään hapen vähenemisen takia.

Itsensä tuleen sytyttävä henkilö saa usein siihen viittaavia palovammoja, koska hän seisoo tai istuu usein sytytyshetkellä. Palovammat keskittyvät silloin käsiin, rintakehän yläosaan ja erityisesti leuan, nenän ja poskien alapuolille.

On myös mahdollista, että itsemurha on tapahtunut muulla tavalla, mutta tulipalo liittyy siihen jotenkin ja on sytytetty välittömästi sitä ennen tai syttynyt pian sen jälkeen. Itsemurhan jäljet saattavat olla tulipalon aiheuttamien jälkien peitossa.

Sairaskohtaukset, muut onnettomuudet, alkoholin, lääkkeiden tai huumeiden yliannostus voivat myös olla kuolinsyynä, joka on sattunut ennen tulipalon syttymistä.

11.3 IHMISTEN KÄYTTÄYTYMINEN TULIPALOISSA

Paloissa menehtyneiden henkilöiden paloa edeltävän ja palonaikaisen toiminnan selvittämisestä on hyötyä paitsi kuolemansyyn tutkinnassa myös palonsyyn tutkimisessa. On aina olemassa mahdollisuus että palossa kuollut henkilö jollakin tavalla liittyy tulipalon syttymiseen joko tahallisesti tai tahattomasti.

Ihmisten käyttäytymiseen tulipaloissa riippuu pääasiallisesti kahdesta seikasta (Bryan 1995)

- 1) palavan rakennuksen asettamista edellytyksistä ja rajoituksista
- 2) tulipaloon viittaavista olosuhteista sillä hetkellä kun henkilö havaitsee palon.

Henkilön selviytymisen kannalta tärkeimmät päätöksenteot ja käyttäytyminen liittyvät hengenvaarallisen tilanteen tajuamiseen palon alkuvaiheessa ennen palokunnan saapumista. Ihmisten käyttäytyminen palotilanteissa on yleensä harkittua ja tarkoituksenmukaista (Bryan 1995). Palotilanne on kuitenkin outo, nopeasti muuttuva tapahtuma, ja päätöksentekoon vaikuttavat asiat saattavat muuttua äkillisesti niin, että tietyllä hetkellä tarkoituksenmukainen ei ole sitä enää hetken päästä. Vaikka henkilö olisi havainnut palon jo sen alkuvaiheessa, hänellä on silti hyvin rajoitetusti aikaa käytettävissä pelastautumiseen.

Savun ja kuumuuden vaikutus henkilön päätöksentekoon on otettava huomioon, kun tutkimuksissa jälkepäin yritetään rekonstruoida henkilön tekemisiä palotilanteessa.

Esimerkiksi ihmiset menevät vain vastentahtoisesti savuisiin tiloihin, ja tämä edellyttää yleensä, että heillä on käsitys poistumistien sijainnista ja arvio etäisyydestä turvalliseen paikkaan savuisessa tilassa. Jos henkilö on savun täyttämässä tilassa, hänen on hyvin vaikea liikkua haluamaansa suuntaan, vaikka tuntisi tilan hyvin. Henkilöt, joka huomaavat tulipalon vaaran myöhäisessä vaiheessa yllättäen, voivat tehdä päätöksiä, jotka jälkepäin vaikuttavat huonoilta, erityisesti yöllä ja/tai kun huoneistoissa on lapsia tai muita henkilöitä.

Jos nukkuva henkilö lisäksi on käyttänyt alkoholia, lääkkeitä tai huumausaineita, selviytymisen mahdollisuudet ovat paljon vähäisemmät. Näissä tapauksissa vainaja löytyy usein kohdasta, missä hän oli palon alkaessa (vertaa kohta 11.1). Hereillä olevat humalaiset tai alkavista myrkytysoireista kärsivät saattavat myös tehdä harkitsemattomia päätöksiä.

Traagisia kohtauksia ihmisten käyttäytymisestä suuressa tulipalossa löytyy esimerkiksi Beverly Hills Supper Club'in palosta pelastuneiden lausunnoista. Kentuckyssa USA:ssa 29.5.1977 sattuneessa palossa menehtyi 164 henkeä ja 70 sai vammoja. Best (1978) kuvaa artikkelissaan tämän murhenäytelmän tapahtumia, tutkimuskomitean tuloksia ja palossa olleiden henkilöiden haastatteluja.

11.4 PALOKUOLEMIEN TUTKINTA

11.4.1. Tutkintajärjestelmä

Laki kuolemansyyn selvittämisestä määrää, että kuolemasta on aina viipymättä ilmoitettava lääkärille tai poliisille. Palokuolematapauksissa poliisi suorittaa oikeuslääketieteellisen kuolemansyyn selvityksen. Oikeuslääkäri tekee aina tässä tapauksessa ruumiinavauksen poliisin kirjallisesta määräyksestä.

11.4.2. Tutkinnassa selvitettävät asiat

Oikeuslääketieteellisessä kuolemansyyn tutkinnassa selvitetään

1. kuolemaan johtaneet syyt

a) välitön kuolinsyy

b) välivaihe

c) peruskuolinsyy,

2. kuolemaan myötävaikuttaneet tai muut samanaikaiset syyt,

3. kuoleman olosuhteet ja

4. kuoleman luokka.

Palokuoleman tutkinnassa pyritään selvittämään, onko uhri ollut elossa ennen paloa ja näin mahdollisesti itse omilla toimillaan voinut aiheuttaa palon vai onko hän jo ollut kuolleena ennen palon syttymistä. Henkirikoksen mahdollisuus ja sen lavastaminen palokuolemaksi on aina otettava tutkinnan alkuvaiheessa korostetusti huomioon.

11.4.3. Suojaamistoimet

Palokuolemissa erityisongelmana on usein vainajan tunnistaminen, koska tulipalon lisäksi sammutus- ja raivaustoiminnot saattavat vaurioittaa ruumista ja vaikeuttaa tunnistamista. Myös vainajan henkilöllisyydestä kertovat paperit ja esineet ovat saattaneet tuhoutua. Tämän ja mahdollisen kuolemaan liittyvän rikosepäilyn takia ruumista ei saa siirtää palopaikalla eikä löytöpaikkaa tai sen ympäristöä raivata sammutustöiden jälkeen ennen poliisin suorittamaa paikan tutkintaa. Jos ruumista on pakko siirtää esimerkiksi lisävaurioiden estämiseksi, löytöpaikka ja sen ympäristö on pyrittävä suojaamaan ja taltioimaan valokuvaamalla tai muulla luotettavalla tavalla jo ennen poliisin paikalle tuloa.

LÄHDELUETTELO

A pocket guide to arson and fire investigation. 1994. Moreton-in-marsh: Factory Mutual International and The Fire Service College. 56 s.

AGA Gashandbok. 1982. Uppsala: Almqvist & Wiksell. 429 s.

Andersson, H. 1995. Anlagda bränders omfattning. Motiv och påverkande faktorer. Stockholm: Institutionen för kriminologi vid Stockholms Universitet. 211 s.

Asetus palavista nesteistä (Suomen Asetuskokoelma 921/76) (kumottu 31.8.1990).

Asetus vaarallisten kemikaalien teollisesta käsittelystä ja varastoinnista (Suomen Asetuskokoelma 682/90).

ASM Handbook, Alloy phase diagrams. 1992. ASM International, Metals Park (OH), Volume 3. 510 s.

Atkins, P.W. 1982. Physical chemistry. 2nd Edition. Oxford: Oxford University Press. 1095 s.

Atreya, A. 1995, Convection heat transfer, Teoksessa: DiNenno, P.J. et al. (toim.) SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Second Edition. Quincy, Mass., National Fire Protection Association. S. 1-39 - 1-64. ISBN 0-87765-354-2

Babrauskas, V. & Krasny, J.F. 1986. Upholstered furniture and mattresses. Teoksessa: Cote, A. E. (toim.) NFPA Fire Protection Handbook, Sixteenth Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association. s. 12-120 - 12-128.

Baker, W.E., Cox, P.A., Westine, P.S., Kulesz, J.J. & Strehlow, R. A. 1983. Explosion hazards and evaluation. Amsterdam: Elsevier. 807 s.

Ballal D.R. & Lefebvre, A.H. 1981. A general model of spark ignition for gaseous and liquid fuel-air mixtures, Eighteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, Pa. 1974 s.

Bartknecht, W. 1980. Explosionen. 2. Auflage. Berlin: Springer. 264 s.

Bauer, C. F., Koza, S.M. & Jenkins, T.F. 1990. Liquid chromatographic method for determination of explosives residues in soil: collaborative study. J. Assoc. Off. Anal. Chem., vol. 73, nro 4. s. 541 - 552.

Beever, P.F. 1995. Self-heating and spontaneous combustion. Teoksessa: DiNenno, P.J. et al. (toim.) SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Second Edition. Quincy, Mass., National Fire Protection Association. S. 2-180 - 2-189. ISBN 0-87765-354-2.

Behrens, U., Langer, G., Stock, M. & Wirkner-Bott, I. 1991. Deflagration-detonation transitions in hydrogen-air-steam mixtures - Relevance of the experimental results for real accident situations, Nuclear Engineering and Design 130, s. 43 - 50.

- Beland, B. 1980. Examination of electrical conductors following a fire. *Fire Technology*, vol. 16, nro. 4, s. 252 - 258.
- Beland, B. 1981. Arcing phenomenon as related to fire investigation. *Fire Technology*, vol. 17, nro. 3, s. 189 - 201.
- Beland, B. 1982a. Considerations on arcing as a fire cause. *Fire Technology*, vol. 18, nro. 2, s. 188 - 202.
- Beland, B. 1982b. Heating of damaged conductors. *Fire Technology*, vol. 18, nro. 3, s. 229 - 236.
- Benard, M.L., Cointot, A., Auzanneau, M. & Sztal, B. 1974. The role of surface reactions in hypergolic ignition of liquid-solid systems. *Combustion and Flame*, vol. 22, s. 1 - 7.
- Berry, R.S., Rice S.A. & Ross, J. 1980. *Physical chemistry*. New York: Wiley. 1264 s.
- Best, R.L. 1978. Tragedy in Kentucky, *Fire Journal* 72, nr. 1, 18 - 44.
- Billmeyer, F.W. Jr.. 1984. *Textbook of polymer science*. Third Ed. New York: Wiley. 578 s.
- Birk, D. M. 1991. *An introduction to mathematical fire modeling*. Lancaster, PA: Technomic. 255 s.
- Boley, B.A. & Weiner, J. H., 1960. *Theory of thermal stresses*. New York: Wiley. 586 s.
- Bowes, P.C. 1984. *Self-heating: evaluating and controlling the hazards*. London: Department of the Environment, Building Research Establishment, Her Majesty's Stationery Office. 500 s.
- Brannigan, F.L., Bright, R.G. & Jason, N.H. 1980. *Fire Investigation Handbook*. NBS handbook 134. Washington, DC: National Bureau of Standards. 187 s.
- Bryan, J.L. 1995. Behavioral response to fire and smoke. Teoksessa: DiNenno, P.J. et al. (toim.) *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Second Edition. Quincy, Mass.: National Fire Protection Association. S. 3-241 - 3-262. ISBN 0-87765-354-2
- Carroll, J. R. 1979. *Physical and technical aspects of fire and arson investigation*. Springfield, Illinois: Charles C Thomas Publisher. 455 s. ISBN 0-398-03785-X.
- Castrantas, H.M., Banerjee D.K. & Noller, D.C. 1965. *Fire and explosion hazard of peroxy compounds*, ASTM Special Technical Publication No. 394. Baltimore: American Society of Testing and Materials. 24 s.
- Cole, L.S. 1992. *The investigation of motor vehicle fires*, Third Edition. Novato, CA: Lee Books. 183 s.
- Cooke, R.A. & Ide, R.H. 1985. *Principles of fire investigation*. Leicester: The Institute of Fire Engineers. 405 s.

Cooley, P. 1981. Motor vehicle non-crash fires. International Congress and Exposition, Detroit, Michigan 23-27.2, 1981. Warrendale, Pennsylvania: Society of Automotive Engineers, Inc. 12 s.

Coward, H.F. & Jones, G.W. 1952. Limits of flammability of gases and vapors, U.S. Bureau of Mines Bulletin 503. 155 s.

Cox G.(ed). 1995. Combustion fundamentals of fire. London: Academic Press. 476 s.

CRC Handbook of Chemistry and Physics. Boca Raton, FA: CRC Press.

Cruice, W.J. 1986. Explosions. Teoksessa: Cote, A. E. (toim.) NFPA Fire Protection Handbook, Sixteenth Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association. S. 4-17 - 4-32.

Davis, N. H. 1986. Lightning protection systems. Teoksessa: Cote, A. E. (toim.) NFPA Fire Protection Handbook, Sixteenth Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association. S. 12-92 - 12-103.

DeHaan, J.D. Kirk's Fire investigation, 3d Ed. Englewood Cliffs, NJ: Brady, 1991. 416 s.

Delplace, M. & Vos, E. 1983. Electric short circuits help the investigator determine where the fire started. Fire Technology, vol 19, nro. 3, s. 185 - 191.

DIN 51 794. 1978. Prüfung von Mineralölkohlenwasserstoffen - Bestimmung der Zündtemperatur. Berlin: Deutsches Institut für Normung. 5 s.

DiNenno, P.J., Beyler, C.L., Custer, R.L.P., Walton, W.D., Watts, J.M. Jr., Drysdale, D. & Hall, J.R. (toim), 1995. SFPE Handbook on Fire Protection Engineering, Second edition, National Fire Protection Association, Quincy, MA.

Drysdale, D.1985. An introduction to fire dynamics. Chichester: Wiley. 424 s.

Durand, J.P., Boscher, Y., Petroff, N & Berthelin, M. 1987. Automatic gas chromatographic determination of gasoline components. Application to octane number determination. J. Chrom., 395, s. 229 - 240.

Eckhoff, R.K. 1991. Dust explosions in the process industries. Oxford: Butterworth. 599 s.

Elbe, L. 1995. Brandstatistik 1994. Brand & Räddning nro 6-7, s. 8 - 10.

EN 57. 1984. Petroleum products - determination of flash point - Abel-Pensky closed tester. Brussels: European Committee for Standardization. 9 s.

English, W.D. 1970. Public safety considerations for liquid rocket propellants, Fire Journal, vol. 64, nro 4, s. 23 - 31.

Field, P. 1982. Dust explosions. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company. 243 s.

Frank-Kamenetski, D.A. 1969. Diffusion and heat transfer in chemical kinetics. Second Edition. New York: Plenum. 574 s.

Friedlander, S.K. 1977. Smoke, dust and haze. New York: Wiley. 317 s.

Funktionsbestemte brandkrav og Teknisk vejledning for beregningsmæssig eftervisning, NKB 1994 Utskotts- och arbetsrapporter 1994:07, Nordiska kommittén för byggbestämmelser, NKB, Brandutskottet, Helsinki. 69 s.

Glassman, I., Papas, P. & Brezinsky, K. 1992. A new definition and theory of metal pyrophoricity. Combustion Science and Technology, vol 83, s. 161 - 165.

Glasstone, S. 1962. The effects of nuclear weapons. Washington, DC: United States Atomic Energy Commission. 730 s.

Gray, D.A., Drysdale, D.D., & Lewis, F.A.S. 1983. Identification of electrical sources of ignition in fires. Fire Safety Journal, vol. 6, nro. 2, s. 147 - 150.

Gross, D. 1985. Data sources for parameters used in predictive modeling of fire growth and smoke spread. NBSIR 85-3223. Washington DC: National Bureau of Standards. 35 s.

Gross, H. & Seelig, E. 1942. Handbuch der Kriminalistik. 8. painos, I nide. Berlin: J. Schweitzer Verlag.

Harmathy, T.Z., (1995) Properties of building materials. Teoksessa: DiNenno, P.J. et al. (toim.) SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Second Edition. Quincy, Mass., National Fire Protection Association. S. 1-141 - 1-155. ISBN 0-87765-354-2.

Harris, R.J. 1983. The investigation and control of gas explosions in buildings and heating plant. London: British Gas Corporation. 194 s.

Heikkonen, P. 1994. Tuhopoltot Suomessa 1990-1993. Helsinki: Palotutkimusraati - Brandforskningsrådet ry. 71 s.

Hinds, W.C. 1982. Aerosol technology: properties, behavior and measurement of airborne particles. New York: Wiley. 424 s.

Hoffman, C. M. & Byall, E. B. 1974. Identification of explosive residues in bomb scene investigations. J. Forensic Sci., vol. 19, s. 54 - 63.

Hogg, J.M. 1963. Fires associated with electric cooking appliances. Fire Research Technical Paper No. 9. London: Her Majesty's Stationery Office. 7 s.

Hölemann, H. & Worpenberg, R. 1992. Brandursache Schweissen, Brennschneiden und Löten - Reichweite und Zündpotential glühender Partikel, vfdp Zeitschrift, vol. 41, nro. 2, s. 79 - 84.

Hölemann, H. & Worpenberg, R. 1994. Brandursache Schweissen, Brennschneiden und Löten - Zündmechanismen glühender Partikel, vfdp Zeitschrift, vol. 43, nro. 2, s. 59 - 64.

ISO/IEC Guide 52. 1990. Glossary of fire terms and definitions. Genève: International Organization for Standardisation. 30 s.

ISO 1516. 1981. Paints, varnishes, petroleum and related products - Flash/no flash test - Closed cup equilibrium method. Genève: International Organization for Standardisation. 5 s.

ISO 1716. 1973. Building materials - Determination of calorific potential. Genève: International Organization for Standardisation. 4 s.

ISO 2592. 1973. Petroleum products - Determination of flash and fire points - Cleveland open cup method. Genève: International Organization for Standardisation. 4 s.

ISO 2719. 1988. Petroleum products and lubricants - Determination of flash point - Pensky-Martens closed cup method. Genève: International Organization for Standardisation. 11 s.

ISO 3679. 1983. Paints, varnishes, petroleum and related products - Determination of flashpoint - Rapid equilibrium method. Genève: International Organization for Standardisation. 7 s.

ISO 6184-1. 1985. Explosion protection systems - Part 1: Determination of explosion indices of combustible dusts in air. Genève: International Organization for Standardisation. 5 s.

ISO 9705. 1993. Fire tests - Full-scale room test for surface products. Genève: International Organization for Standardisation. 31 s.

Jenkins, T.F., Walsh, M.E., Schumacher, P.W. & Miyares, P.H. 1989. Liquid chromatographic method for determination of extractable nitroaromatic and nitramine residues in soil. J. Assoc. Off. Anal. Chem., vol 72, nro. 6 , s. 890 - 899.

Johansson, C.H. & Persson, P.A. 1970. Detonics of high explosives. London: Academic Press Inc. 330 s.

Jones, J.C. 1993. Predictive calculation of the effect of an accidental heat source on a bed of forest litter. Journal of Fire Sciences, vol. 11, nro 1, s. 80 - 86.

Jonson, S. 1993. Electrical causes of fires with special emphasis on primary and secondary damages: A review of the literature. Linköping: SKL - Kriminaltekniska laboratoriet. 17 s. (SKL - Kriminaltekniska laboratoriet, Report 29.)

Joshi, A.A. & Pagni, P.J., 1994a. Fire-induced thermal fields in window glass. I - Theory. Fire Safety Journal, vol. 22, nro 1, s. 25 - 43.

Joshi, A.A. & Pagni, P.J., 1994b. Fire-induced thermal fields in window glass. II - Experiments. Fire Safety Journal, vol. 22, nro 1, s. 45 - 65.

Kallioniemi, P. & Laamanen, R. 1995. Tuhoisasta ylipainekaton palosta selvittiin kesäseisokin aikana. Teollisuusvakuutus, vol. 94, nro 1, s. 18 - 23.

Kanury, A.H. 1981. Limiting case fires arising from fuel tank/pipeline ruptures, Fire Safety Journal, vol. 3, nro 3, s. 215 - 226.

Karlsson, J. 1988. Tulipaloissa 307 uhria vuosina 1985-87. Palontorjunta, vol. 39, nro 10, s. 10 - 11.

Katajamäki, J. 1993a. Sammutustyö korkeuksissa vaati kaksi kuolonuhria sellutehtaan hakekuljettimella. Kuusankoskella. Pelastustieto, vol. 44, nro 4, s. 8 - 9.

Katajamäki, J. 1993b. Kuusankosken hakekuljettinpalon tutkijalautakunta jätti raporttinsa. Pelastustieto, vol. 44, nro 8, s.10 - 12.

Katajamäki, J. 1989 Puutteellinen varustus merkittävin osasyypalomiehen kuolemaan ja toisen loukkaantumiseen. Palontorjunta, vol. 40, nro 1, s. 12 - 24.

Kauppi, O. 1975. Sähköstä aiheutuva palovaara. Teoksessa: Sähkölaitteet ja paloturvallisuus. Helsinki: Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus - Julkaisu 86 - 75.

Kelly, R. L. & Martz, R. M. 1984. Accelerant identification in fire debris by gas chromatography/mass spectrometry techniques. Journal of Forensic Sciences, vol 29, nro. 3, s. 714 - 722.

Kemikaaliasetus (Suomen Asetuskokoelma 620/90)

Kemikaalilaki (Suomen Asetuskokoelma 744/89)

Keski-Rahkonen, O. 1986a. Palon kehittymisen perusteita. Helsinki: Suomen Palontorjuntaliitto. 38 s.

Keski-Rahkonen, O. 1986b. Sprinkleriteknikka nestepaloissa. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes 603. 94 s.

Keski-Rahkonen O. 1987. Tulipalojen numeerinen simulointi I. Palontorjuntateknikka, vol. 17, nro 4, s. 133 - 136.

Keski-Rahkonen O. 1988a. Breaking of window glass close to fire. Fire and Materials, vol. 12, nro 2, s. 61 - 69.

Keski-Rahkonen O. 1988b. Tulipalojen numeerinen simulointi II. Palontorjuntateknikka, vol. 18, nro 2, s. 14 - 18.

Keski-Rahkonen O. 1988c. Tulipalojen numeerinen simulointi III. Palontorjuntateknikka, vol. 18, nro 3, s. 26 - 28.

Keski-Rahkonen O. 1988d. Tulipalojen numeerinen simulointi IV. Palontorjuntateknikka, vol. 18, nro 4, s. 25 - 25.

Keski-Rahkonen O. 1990. Ikkunoitten rikkoutuminen tulipalossa. Palontorjuntateknikka, vol. 20, nro. 3, s. 20 - 22.

Keski-Rahkonen, O. 1991. Breaking of window glass close to fire. II: Circular panes. Fire and Materials, vol 15, nro 1, s. 11 - 16.

Keski-Rahkonen, O. 1992. Effect of the substrate on the results of fire tests of thin layers of floor, wall, and ceiling coverings. Espoo: Technical Research Centre of Finland. VTT Publications 111. 37 s. + liitt. 7 s.

- Keski-Rahkonen, O. 1994. Pölyräjähdysten peruskäsitteet ja pölyjen räjähdysvaaran testaus. Helsinki: AEL-INSKO. 22 s.
- Keski-Rahkonen, O., Björkman J. & Farin, J. 1997. Derating of cables at high temperatures, Espoo: Technical Research Centre of Finland. VTT Publications 302. 57 s + 2 s. liitt.
- Keski-Rahkonen, O. 1997a. Multiple fire deaths. Fire Safety Journal, julkaistavana.
- Keski-Rahkonen, O. 1997b. Palokuolemien riskistä Suomessa ja ulkomailla. Palontorjuntatekniikka, vol. 27, nro 4.
- Klinkenberg, A. & van der Minne, J.L. 1958. Electrostatics in the petroleum industry. Amsterdam: Elsevier. 72 s.
- Kordina, K. & Meyer-Ottens, C. 1981. Beton Brandschutz Handbuch. Düsseldorf: Beton-Verlag. 437 s.
- Kuchta, J.M. 1986. Investigation of fire and explosion accidents in the chemical, mining, and fuel-related industries - A Manual, Bulletin 680, Bureau of Mines. Washington DC: U.S. Department of Interior. 84 s.
- Kuivalainen, H. & Lähde A.-M. 1997. Luettelo yleisimmistä palavista nesteistä. Helsinki: Turvatekniikan keskus. 33 s.
- Kulkarni, S.G. & Panda, S.P. 1980. Role of thermal degradation of hybrid rocket fuels in hypergolic ignition and burning with RFNA as oxidizer. Combustion and Flame, vol. 39, s. 123 - 132.
- Kuo, K.K. 1986. Principles of combustion. New York: Wiley. 810 s.
- Kurki-Suonio, I., 1981. Polttoaineet ja palaminen. Teoksessa: Tekniikan käsikirja, osa 2. 8. painos. Jyväskylä: Gummerus. S. 541 - 604.
- Kärkkäinen, M., Seppälä, I. & Himberg, K. 1994. Detection of trace levels of gasoline in arson cases by gas chromatography-mass spectrometry with an automatic on-line thermal desorber. Journal of Forensic Sciences, vol 39, nro.1, s. 186 - 193.
- Lautkaski, R. 1997. Understanding vented gas explosions. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes 1812. 129 s.
- Lautkaski, R. & Teräsmaa, I. 1990. Vaarallisten aineiden torjunta. Helsinki: Valtion painatuskeskus. 178 s.
- Lee, S.D. & Chung, S.H. 1994. On the structure and extinction of interacting lean methane/air premixed flames. Combustion and Flame, vol. 98, s. 80 - 92.
- Lees, F.P. 1980. Loss prevention in the process industry. Vol. 1. London: Butterworth & Co. 671 s.

Lewis, B. & von Elbe, G. 1961. Combustion, flames and explosions of gases. Second Edition. New York: Academic Press. 731 s.

Lääkintöhallitus. 1989. Mielenterveyden häiriöiden diagnostinen ja tilastollinen ohjeisto DSM-III-R. Helsinki: Valtion painatuskeskus. 70 s.

Makin, B. 1975. Static electrification in supertankers. *Physics in Technology*, vol. 6, nro 3, s. 109 - 116.

Mangs, J., Mikkola E., Kokkala, M., Söderbom, J., Stenhaug E. & Ostrup, I. 1991. Room/corner test round robin. Project 2 of the EUREFIC fire research programme. Espoo: Technical Research Centre of Finland, Research Reports 733. 36 s. + liitt. 26 s.

Mangs, J. & Keski-Rahkonen, O. 1993. Fire testing of shotcrete samples in a small furnace, in John C. Sharp, Tomas Franzen (Ed). Shotcrete for underground support V. Proceedings of the Engineering Foundation Conference. New York: American Society of Civil Engineers. NY. S. 297 - 296. ISBN 0-87262-944-9

Marinkas, P. L. 1986. *Journal of Energetic Materials*, 4.

McCaffrey, B. 1979. Purely buoyant diffusion flames: some experimental results, NBSIR 79-1910. Washington DC: National Bureau of Standard. 49 s.

McGinley, H. 1986. Motor vehicles. Teoksessa: Cote, A. E. (toim.) NFA Fire Protection Handbook, Sixteenth Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association. s. 13-20 - 13-30.

McGuire, J.H. 1970. Mirror-caused fire, *Fire Journal*, vol. 64, nro 4, s. 12 - 13.

Meyer, R. 1987. Explosives. New York: Verlag Chemie. 459 s.

Midkiff, C.R. & Washington, W. D. 1976. Systematic approach to the detection of explosive residues IV. Military explosives. *J. Assoc. Off. Anal. Chem.*, vol. 59, nro 6, s. 1357 - 1374.

Miekk-oja, H.M. 1965. Metallioppi. 3. painos. Helsinki: Otava. 671 s.

Mikkola, E. 1990. Puun hiiltyminen. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Tutkimuksia 689. 40 s.

Milke, J.A. 1995. Analytical methods for determining fire resistance of steel members. Teoksessa: DiNenno, P.J. et al. (toim.) SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Second Edition. Quincy, Mass., National Fire Protection Association. S. 4-174 - 4-201. ISBN 0-87765-354-2.

Mitler, H.E. 1978. The physical basis for the Harvard Computer Fire Code, Harvard University Home Fire Project T.R. #34.

Mitler, H.E. 1991. Mathematical modeling of enclosure fires. Teoksessa E.S. Orain & J.B. Boris (toim.) Numerical Approaches to Combustion Modeling, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 135, Washington DC. s. 711 - 753.

Mniszewski, K.R. 1994. The Pepcon Plant fire/explosion: A rare opportunity in fire/explosion investigation. *Journal of Fire Protection Engineering*, vol. 6, nro. 2, s. 63 - 78.

Nagy, J. & Verakis, H.C. 1983, *Development and control of dust explosions*. New York: Dekker. 279 s.

NFPA 491M. 1991. *Hazardous chemical reactions*, 1991 Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 241 s.

NFPA 907M. 1988. *Manual for the determination of electrical fire causes*, 1988 Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 38 s.

NFPA 921. 1995. *Guide for fire and explosion investigations*, 1995 Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 162 s.

NT FIRE 045. 1992. *Solid materials: spontaneous ignition temperature by continuous heating*. Espoo: Nordtest. 7 s.

Nyström, E.J. 1962. *Graafinen esitys ja nomografia*. Helsinki: Otava. 130 s.

O'Laughlin R. 1986. *Metals*. Teoksessa: Cote, A. E. (toim.) *NFPA Fire Protection Handbook*, Sixteenth Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association. S. 5-107 - 5-133.

Ollila, O. 1963. Typpi Oy:n ammoniumnitraattiräjähdyks ja muutamia siihen liittyviä selvittelyjä. *Palontorjunta*, vol. 14, nro 3, s. 143 - 145.

Pagni, P.J. 1993. Causes of the 20 October 1991 Oakland Hills conflagration. *Fire Safety Journal*, vol. 21, nro. 4, s. 331-339.

Palontorjunta. 1979. Palo rekonstruoitiin kaksi viikkoa myöhemmin. *Palontorjunta*, vol. 30, nro 2, s. 79-80.

Parkus, H., 1976. *Thermoelasticity*. 2nd Ed. Vienna: Springer. 119 s.

Peacock, R.D., Forney, G.P., Reneke, P., Portier, R. & Jones, W.W. 1993. CFAST, the consolidated model of fire growth and smoke transport, NIST Technical Note 1299, National Institute of Standards and Technology. 241 s.

Phillips, C.C. & McFadden, D.A. 1982. *Investigating the fireground*. Saddle Brook, NJ: Fire Engineering Books and Videos. 280 s.

Pitts, W.M. 1991. Wind effects on fires. *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 17, s. 83 - 134.

Purser, D.A. (1995) Toxicity assessment of combustion products. Teoksessa: DiNenno, P.J. et al. (toim.) *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Second Edition. Quincy, Mass.: National Fire Protection Association. S. 2-85 - 2-146. ISBN 0-87765-354-2

Quintiere, J. & Perspective, A. 1984. On compartment fire growth. *Combustion Science and Technology*, vol. 39, s. 11 - 54.

Rabinkov, V.A. 1988. The distribution of flammable gas concentrations in rooms. *Fire Safety Journal*, vol. 13, nro. 2&3, s. 211-217.

Rahikainen, J. 1997. Palotilastojen analysointi toiminnallisten palosäädösten pohjaksi, Diplomityö. Espoo: Teknillinen korkeakoulu.

Raiko, R., Kurki-Suonio, I., Saastamoinen, J. & Hupa, M. (toim.), 1995. Poltto ja palaminen. Jyväskylä: Gummerus. 629 s.

Rautaheimo, J. 1991. Murhapolttajan muotokuva 1991. 18 s.

Rizzi, A. 1991. *Journal of the Forensic Sciences Society*, vol. 31, s. 309 - 319.

Roark, R.J. 1965. *Formulas for stress and strain*. New York: McGraw-Hill. 763 s.

Rockett, J.A. & Milke, J.A. 1995. Conduction of heat in solids. Teoksessa: DiNenno, P.J. et al. (toim.) *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Second Edition. Quincy, Mass., National Fire Protection Association. S. 1-25 - 1-38. ISBN 0-87765-354-2.

Roth & Weller, *Gefährliche Chemische Reaktionen*, ecomed, Landsberg/Lech (1982 jatkuvasti täydennetty).

Räjähdystarvikekaupan opas. 1988. Räjähdyssainetukkukauppojen yhdistys r.y.

Räjähdystarviketiedosto. 1991. Räjähdystarvikeyhdistys Valtion painatuskeskus.

Räsänen, P. 1995. Mielentilatutkittu murhapolttaja. Oulu: Oulun yliopisto. 70 s. + liitteet 45 s. (*Acta Universitatis Ouluensis Medica D 340*.)

Salonen, R. 1994. Staattisen sähköön vaaratekijät ja niiden tunnistaminen. Ael-INSKO koulutustilaisuus: Staattinen sähkö vaaratekijänä teollisuudessa, 22.11.1994. Helsinki: Ael-INSKO. 21 s.

Schacht, P.K. 1986. Fluid power systems. Teoksessa: Cote, A. E. (toim.) *NFPA Fire Protection Handbook*, Sixteenth Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association. s. 10-19 - 10-21.

Schumb, W.C., Satterfield, C.N. & Wentworth, R.L. 1955. *Hydrogen peroxide*. New York: Reinhold. 759 s.

SFS 3500. 1982. Räjätysnallit. Yleiset ominaisuudet ja laatuvaatimukset. 2. painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. 7 s.

SFS 3683. 1984. Kotitaloudessa käytettävät kaasulaitteet. Rakenne ja toimintavaatimukset. Testaus. 2. painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. 27 s.

SFS 5347. 1987. Räjähdystarvikkeiden luokitus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. 17 s.

SFS-käsikirja 39. 1986. Palavat nesteet ja öljylämmityslaitokset. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto, 2. painos. 497 s.

SFS-käsikirja 60. 1984. Räjähdyksvaaralliset pölyt. Turvallisuusohjeet. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 67 s.

SFS-käsikirja 118. 1990. Palavat nesteet ja kaasut. Potentiaalintaus ja maadoitus. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 81 s.

Shreir, L.L., Jarman, R.A. & Burstein, G.T. (eds), 1994. Corrosion. 3rd Ed. Oxford: Butterworth. S. 4:18.

Simard, A.J., Deacon, G.D. & Adams, K.B. 1982. Nondirectional sampling of wildland fire spread. Fire Technology, vol. 18, nro. 3, s. 221 - 228.

Simonson, M. 1996, Hydraulic fluids: fire characteristics and classification.. Borås: Swedish National Testing and Research Institute. 20 s. (SP Report 1996:24).

Simmons, R.F. 1995. Premixed burning. Teoksessa: DiNenno, P.J. et al. (toim.) SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Second Edition. Quincy, Mass., National Fire Protection Association. S. 1-131 - 1-140. ISBN 0-87765-354-2.

Skelly, M.J., Roby, R.J. & Beyler, C.L. 1991. An experimental investigation of glass breakage in compartment fires. Journal of Fire Protection Engineering, vol. 3, nro. 1, s. 25 - 34.

Smith, F.P. 1991. Concrete spalling: controlled fire tests and review. J. Forensic Science Society, vol 31, nro 1, s. 67 - 75.

Smith, R.M. 1982. Arson analysis by mass chromatography. Anal. Chem., vol. 54, nro. 13, s. 1399 - 1409.

Smith, R.M. 1983. Mass chromatographic analysis of arson accelerants. J. Forensic Sci., vol 28, nro. 2, s. 318 - 329.

Sorbe, Sicherheitstechnische Kenndaten, Gefahrenindex chemischer Stoffe, ecomed verlagsgesellschaft, Landsberg/Lech (viimeinen päivitys 1996).

Steckler, K.D., Evans, D.D. & Snell, J.E. 1991. Preliminary study of the 1991 Oakland Hills fire and its relevance to wood-frame, multi-family building construction. NISTIR 4724. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology. 17 s. + liitt. 30 s.

Sulonen, M. 1981. Metalliopin perusteet. Teoksessa Tekniikan käsikirja, osa 2. 8. painos. Jyväskylä: Gummerus. S. 251 - 278.

Suomen rakentamismääräyskokoelma, E3. Pienet savuhormit, ohjeet 1988. Helsinki: Ympäristöministeriö. 16 s.

Suuronnettomuuden tutkintaselostus N:o 2/1989, Neste Oy:n Porvoon tuotantolaitosten varastosäiliön R-2 tulipalosta 23.-24.3. 1989. Helsinki: Oikeusministeriö (1990). 78 s.

Sähköala 1994. Sähköturvallisuus ja vakuutukset Suomessa-palovahingot. Sähköala nro 4, s. 39 - 40.

- Tanaka, T. & Nakamura, K. 1989. A model for predicting smoke transports in buildings based on two layers zone concept. BRI-report No.123. Building Research Institute, Ministry of Construction. 276 s. (japaninkielinen).
- Tebbett, I. 1992. Gas chromatography in forensic science, Ellis Horwood Limited. s. 109-147.
- Teollisuusvakuutus 1994. Suojeluohje C6. Helsinki. 7 s.
- Tien, C.L., Lee, K.Y. & Stretton, A.J., 1995. Radiation heat transfer. Teoksessa: DiNenno, P.J. et al. (toim.) SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Second Edition. Quincy, Mass., National Fire Protection Association. S. 1-65 - 1-79. ISBN 0-87765-354-2
- Tobin, W.A. & Monson, K.L. 1989. Collapsed spring observations in arson investigations: a critical metallurgical evaluation. Fire Technology, vol. 25, nro 4, s. 317 - 335.
- Torero, J.L. & Fernandez-Pello, A.C. 1995. Natural convection smolder of polyurethane foam, upward propagation. Fire Safety Journal 24, nro 1, s. 35 - 52.
- Torero, J.L. & Fernandez-Pello, A.C. 1996. Forward smolder of polyurethane foam in a forced air flow. Combustion and Flame, vol. 106, s. 89 - 109.
- Työpaikan kemikaalilainsäädäntö. 1994. Helsinki: Valtion painatuskeskus. 205 s.
- Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie. 3. Auflage. 1953. München: Urban & Schwarzenberg. 3. Band, S. 428 - 436.
- U.S. Consumer product safety commission 1992. Electrical fire losses 1990. U.S. Consumer product safety commission. Muistio.
- VDI-Wärmeatlas, 4. Auflage. 1984. Verein Deutscher Ingenieure. Düsseldorf: VDI-Verlag. s. Dc1 - Dc5.
- Vilyunov V.N. & Zarko, V.E. 1989. Ignition of solids. Amsterdam: Elsevier. s. 181 - 187.
- Virolainen, R. K., Keski-Rahkonen, O., Pulkkinen U. & Vuori, S. 1993. Fire risk analysis, in R.K. Virolainen (ed.), State of the art level-1 PSA methodology, NEA/CSNI/R(92) 18, Committee on the Safety of Nuclear Installations (CSNI), OCDE Nuclear Energy Agency, Issy-le-Moulineaux, France. Chapter 4.
- Weckman, H. 1987. On the influence of structural factors and furnishings on the progress of fire in premises for nursing and special care. CTIF XVIth International Symposium, 21-24 October 1987, Portugal. International technical committee for the prevention and extinction of fire. S. 40 - 55.
- Weston, P.B. & Wells, K.M. 1994. Criminal investigation. Basic perspectives. 6th Edition. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall Career & Technology. 446 s.
- Williams, F. A. 1985. Combustion Theory. 2nd Edition. Menlo Park CA: Benjamin/Cummings Publishing Company. 680 s.

Williams, F.A. 1982. Urban and wildland fire phenomenology. Progress of Energy and Combustion Science, vol. 8, s. 317 - 354.

Woodward, C.D. 1995. Motiven för anlagda bränder. En analys gjord i England. Arson, nro 1, s. 1 - 5.

Yallop, H.J. 1980. Explosion investigation. Edinburgh: The Forensic Science Society. 276 s.

Yinon, J. 1993. Advances in analysis and detection of explosives. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 540 s.

Yinon, J. & Zitrin, S. 1981. The analysis of explosives. Oxford: Pergamon Press. 310 s.

Ylinen, A. 1950. Kimmo- ja lujuusoppi, osa II. Porvoo: WSOY. 1011 s.

Zabetakis, M.G. 1965. Flammability characteristics of combustible gases and vapours. US Bureau of Mines, Bulletin 627. 121 s.

Zalosh, R.G. 1995. Explosion protection. Teoksessa: DiNenno, P.J. et al. (toim.) SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Second Edition. Quincy, Mass., National Fire Protection Association. S. 3-312 - 3-329. ISBN 0-87765-354-2

HAKEMISTO

A

Aikajana.....	174
Ajoneuvopalot.....	197
Akroleiini.....	262
Aktivoitumisenergia.....	25
Alempi Chapmanin-Jouget'n piste.....	43
Alempi palamislämpö.....	20
Alempi syttymisraja.....	27
Alkupalo.....	31
Aloiteräjähdyksaineet.....	224
Aloituserä.....	24
Alumiini.....	77; 129
Ammoniumnitraatti.....	168
Ammoniumperkloraaatti.....	177
Arrheniuksen yhtälö.....	25
Asetyleeni.....	209
Augerelektronispektroskopia.....	127
Auringonvalo.....	172
Autopalot.....	65
Avoliekki.....	123

B

BLEVE.....	216
Butaani nestekaasuna.....	209

C

Chapmanin-Jouguet'n huippu.....	231
---------------------------------	-----

D

Deflagraatio.....	44
Deterministiset mallit.....	182
Detonaatio.....	44; 217; 235
Detonaatioalue.....	42
Diffuusioliekki.....	19; 35

E

Eläimet.....	171
Epätäydellinen oikosulku.....	126
Epätäydellinen palaminen.....	19; 223
Esilämmitysvyöhyke.....	35
Esisekoitettu kaasuliekki.....	19
Estetty muodonmuutos.....	84
Etenemisnopeus.....	25
Etenemisreaktio.....	24

F

Frank-Kamenetskin parametri.....	162
----------------------------------	-----

H

Hajusteaine.....	219
Hamppuöljy.....	60
Hapettuminen.....	75
Hapettumisreaktion nopeus.....	25
Happi.....	209
Happirajoitteinen palo.....	180
Hehkulamppu.....	121; 140
Hehkupalo.....	22; 24
Heinäpaali.....	165
Hengitysteiden palovammat.....	263
Hihnakuuljetin.....	141
Hiili.....	165
Hiilimonoksidi.....	19; 209; 223; 261
Hiiltyminen.....	70
Hiililymisnopeus.....	70
Hiililymissyvyys.....	70; 249
Hiukkaskoko.....	221
Hugoniot'n yhtälö.....	40
Humahdus.....	44; 217
Humahdusalue.....	41
Huokoinen aine.....	160
Huonepalo.....	31; 93
Hypergolinen seos.....	168
Hälytyskeskus.....	54
Höyrykattila.....	215
Höyrykattilan räjähdys.....	235
Höyryräjähdys.....	216; 235

I

Ihmisten käyttäytyminen tulipaloissa.....	264
Ihon palovammat.....	263
Ikkunalasit.....	80; 241
Ikkunat.....	103
Ilmanvaihtotekijä.....	31
Itsestään syttyvät aineet.....	60
Itsesyttyminen.....	160
Itsesyttymislämpötila.....	27; 218

J

Jähmeän aineen pinnan syttyminen.....	30
Jäähdytysvyöhyke.....	35

K

Kaarihitsaus.....	142
Kaarileikkaus.....	142
Kaasuhitsaus.....	142
Kaasujen ja nesteiden palaminen.....	34
Kaasujen palaminen.....	37
Kaasujen syttyminen.....	27
Kaasukromatografi.....	111
Kaasulaitteet.....	65
Kaasuliesi.....	121
Kaasun sekoittuminen ilmaan.....	211
Kaasun syttyminen.....	211
Kaasupalon selvittäminen.....	212
Kaasupalot.....	209
Kaasuräjähdykset.....	39
Kaasusoihtu.....	211
Kaasuvuoto.....	218
Kaksivyyöhykemalli.....	183
Kappaleen epätasainen lämpeäminen.....	73
Kartiokalorimetri.....	196
Karvat.....	61
Katalyyttiset materiaalit.....	168
Katkaistu kartio.....	90
Kemialliset näytteet.....	59
Kemialliset reaktiot.....	165
Kemialliset räjähdykset.....	216
Kemikaalit.....	166
Kenttämallit.....	182
Kestomuovit.....	76
Kiilahihnat.....	141
Kipinäpurkaus.....	132
Kipinät.....	33
Kipinäointi.....	142
Kipsilevy.....	94
Kitka.....	141
Kokeelliset palorekonstruktiot.....	192
Kosketusvarautuminen.....	133
Kosteus.....	222
Kotitalouskoneet.....	64
Kourukuljetin.....	141
Kraatteri.....	235
Kuidut.....	61
Kuorma-autot.....	207
Kupari.....	77; 129
Kuuma kappale.....	163
Kuuma tuhka.....	120
Kuumat liitokset.....	130
Kylmäkoneet.....	64

Kytevä palaminen.....	144
Kytevä palo.....	23; 25
Kytöpalo.....	248
Kytörintama.....	25

L

Laakerit.....	141
Laikkaleikkaus.....	142
Lasin rikkoutuminen.....	81
Lasit.....	61
Lasten tulitikkuleikit.....	146
Lastulevy.....	95
Latvapalo.....	246
Lausuntojen luotettavuus.....	119
Leimahduslämpötila.....	29
Liekin adiabaattinen lämpötila.....	27
Liekkipalo.....	20; 23
Liekkirintaman etenemisnopeus.....	36
Lieskahdus.....	31; 180
Lievä vahingonteko.....	14
Lisäysreaktio.....	24
Lohkeilu.....	73
Loistevaloputket.....	122
Louhintaräjähdyksaineet.....	225
Lyijy.....	77
Lämmityslaitteet.....	119
Lämmönsiirtoprosessit.....	32
Lämpöhalvaus.....	263
Lämpöjännitykset.....	73
Lämpölaajeneminen.....	78
Lämpöräjähdys.....	160
Lämpösokki.....	73; 84
Lämpötilanjohtavuus.....	25
Lämpötunkeutumiskerroin.....	30; 117
Lämpövaikutus.....	233
Lämpövastus.....	139
Löysät liitokset.....	130

M

Maadoittaminen.....	133
Maalit.....	61
Maastopalo.....	245
Maastopalon etenemisnopeus.....	245
Maastopalon syttymissyitä.....	252
Maastopalon tutkiminen.....	247
Maasulku.....	125
Massaspektrometri.....	113
Materiaalien sulaminen.....	75

Materiaalin palo-ominaisuudet	196
Mekaaniset räjähdyskset.....	215
Mekaaniset syttymissyöt.....	65
Metaani	209
Metallien hionta.....	142
Metallien seostuminen	77; 129
Minimisyttymisenergia	28; 133; 218
Muotojäljet.....	62
Murtautumisjäljet.....	59
Myrkylliset palokaasut.....	260

N

Narkoottiset kaasut	261
Natriumkloraaatti.....	168
Nesteen höyrynpaine	28
Nesteiden syttyminen.....	28
Nestekaasu	209
Nestelammikko.....	38
Nestepalo	190
Nestepinnan alenemisnopeus	38
Nestepinta.....	38
Noki	19; 78
Numeerinen simulointi	180
Nuohous.....	47; 121
Nuolikuviot.....	91

O

Oakland Hillsin maastopalo	245
Oikosulku.....	125
Orgaaniset peroksidit	168
Osoitinkuviot	91
Ovet.....	103

P

Paikallinen maastopalo	246
Paineaallon fysiologiset vaikutukset.....	240
Paineaalto.....	230
Paineenkevennys.....	234
Palamisen edellytykset.....	18
Palamisreaktio	20
Palamisräjähdys	217
Palava kaasu.....	209; 218
Palavat nesteet.....	59; 108; 218
Palavien nesteiden luokitus.....	108
Palo pinnan alla.....	246
Palojäljen matalin kohta.....	86
Palojäljet	68; 85
Palojäännökset	105
Palokaasuräjähdys	33; 38

Palokammio	93
Palokuolemat	254
Palokuolemien tutkinta	265
Palokuorma.....	189
Palon laskeminen huonetilassa	190
Palon leviäminen johtumalla	33
Palon leviäminen kuljettumalla	33
Palon leviäminen säteilemällä	34
Palon numeerinen simulointi	179
Palopaikan raivaus	105
Palopatsas	89; 180; 184
Palorikos	12
Palotapahtumien ajoittaminen.....	174
Palotapahtumien rekonstruointi.....	179
Palotarkastus	47
Paloteho.....	39; 189
Palovaurio.....	104
Pehmustetut kalusteet	145
Pellavaöljy	60
Perätön vaarailmoitus	13
Piirustus	55
Pintapalo	246
Pitkät jäljet.....	92
Polttoaine	18
Polttoainerajoitteinen palo	180
Polttoleikkaus	142
Polttopiste	172
Polyvinyylidikloridi PVC	262
Propaani	209
Puhtaaksi palanut alue	79
Putkistovuoto	211
Pyroforinen kipinä.....	163
Pyroforisuus	169
Pyrolyysi	21; 223
Pyrolyysituotteet	223
Pyromania	147
Pyrotekninen aine	223; 228
Pyörteisyys.....	222
Päättymisreaktio	24
Pöly.....	220
Pölypitoisuus	222
Pölyräjähdys	220

R

Radikaali	23
Rakennuspiirustus.....	55
Rasvakattila.....	121
Rayleighin suora.....	40

Reaktiovyöhyke.....	35
Rekat.....	207
Rintamareaktio.....	216
Ruoanlaitto.....	121
Ruuti.....	227
Räjähdyksen alkukohta.....	242
Räjähdyksen maksimiylipaine.....	240
Räjähdys.....	214
Räjähdysaalto.....	39
Räjähdysaine.....	60; 223; 235
Räjähdysjälki.....	104
Räjähdyskeskus.....	61; 235
Räjähdyspaikan tutkiminen.....	236
Räjähdystarvike.....	223
Röntgenkuvaus.....	125
S	
Sade.....	171
Salama.....	134
Salpietari.....	170
Sammumisvaihe.....	31
Satelliittikuva.....	248
Savu.....	78
Savuhormit.....	120
Savujälki.....	79
Savuke.....	144
Seisminen vaikutus.....	233
Seostuminen.....	129
Silminnäkijä.....	66
Sinkki.....	77; 129
Sirpaleiden vaikutus.....	232
Sotilasräjähdysaineet.....	227
Staattinen sähkö.....	132
Sulamislämpötila.....	76
Suojaetäisyys.....	34
Suojavaatetus.....	45
Syaanivetykaasu.....	261
Syttymisenergia.....	116
Syttymisherkkyyys.....	118
Syttymiskohta.....	68; 100
Syttymislähde.....	116
Syttymislämpötila.....	29
Syttymisrajat.....	27
Syttymisviive.....	165
Sytytysliekki.....	30
Sytytystarvikkeet.....	228
Sähköasennustarvike.....	63
Sähköjohdin.....	63

Sähkökeskus.....	64
Sähkölaite.....	137
Sähköliesi.....	64; 121
Sähkölämmitin.....	63
Sähkömoottori.....	64; 132
Sähkönjakelu.....	136
Sähköpalo.....	123
Säilymislaki.....	39

T

Taajuustekijä.....	25
Tapahtumapuu.....	177; 178
Televisio.....	140
Termiittireaktio.....	76
Tiimalasikuviot.....	89
Tilareaktiot.....	216
Tuhka.....	19
Tuhopolttaja.....	146
Tuhopoltto.....	146
Tuhotyö.....	12
Tulitikut.....	145
Tulityöt.....	23; 142
Tulvavesi.....	171
Tupakointi.....	144
Turbulenssi.....	222
Tutkintavelvollisuus.....	15
Tuuli.....	171
Työkonepalot.....	65
Työturvallisuus.....	45; 236
Täydellinen palaminen.....	19
Täysin kehittyt palo.....	31
Törkeä tuhotyö.....	12
Törkeä vahingonteko.....	14
Törkeä yleisvaaran tuottamus.....	13

U

Ukkonen.....	138
U-muotoiset kuviot.....	89

V

Vaaralliset aineet.....	167
Vaarallisuusluokka.....	224
Vahingonteko.....	14
Vakuutuspetos.....	13
Valaisimet.....	65
Valaistus.....	121
Valokaaren jättämät jäljet.....	128
Valokaaren lämpötila.....	127
Valokaari.....	126

Valokuvaus	48
Vaneri	94
Vapaa kaasupilvi.....	38
Varastosiilo	160; 165
Varautuminen	133
Varmuusräjähdyksineet.....	226
Venepalot.....	65
Veritahrat	62
Verkkomallit	183
Vetojännitys.....	82
Vety.....	209
Vetyperoksidi.....	168
Videokuvaus	49
Virtain kunnalliskodin palo	193
V-jälki	88
von Neumannin piikki	231
Vyöhykemallit	182
Väärin käytetyt sähkölaitteet.....	124

Y

Yleisvaarallisen rikoksen valmistelu	13
Yleisvaaran tuottamus	13
Ylempi Chapmanin-Jouget'n piste	43
Ylempi syttymisraja.....	27
Ylikuormitus.....	131
Ylikuormitussuojaus	132
Ylikuumeneminen	65
Ylivirtasuojaja	131
Ylösalaiset V-kuviot	88

Ä

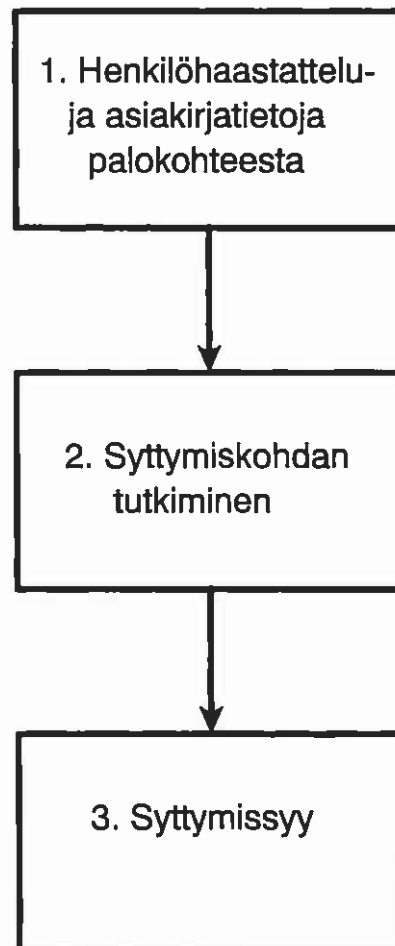
Ärsyttävät kaasut	262
-------------------------	-----

Ö

Öljylämmityslaitteet.....	65
---------------------------	----

Muistilista palonsyyn selvittämisen tueksi

Seuraavassa esitetään muistilista kolmen taulukon muodossa palonsyyn selvittämisen tueksi. Vuokaaviona taulukot liittyvät toisiinsa seuraavasti:



Taulukon 1 tiedot eivät ole tiukasti sidoksissa tiettyihin henkilöryhmiin. Esimerkiksi "silminnäkijöiden tietoja" voi yhtä hyvin saada palokunnalta. Taulukkoja voidaan laajentaa hyvinkin pitkälle yksityiskohtiin ja eri viranomaisten menettelytapoihin; tässä esitetään varsinaiseen tulipalotapahtumaan liittyvät keskeisimmät seikat.

Taulukko 1. Henkilöhaastattelu- ja asiakirjatietoja palokohteesta

	Henkilöhaastattelutietoja		Asiakirjatietoja
Silminnäkijöiden tiedoja	Tiloissa asuvien tai työskennelleiden tiedoja	Palokunnan tietoja	
Tarkka aika, jolloin ensimmäinen havainto palosta tehtiin	Tilan kalustus ja siellä säilytetty omaisuus	Missä, milloin ja missä laajuudessa palokunta havaitsi liekkejä	Palotarkastus- ja nuohoustiedot
Missä havainnon tekijä palokohteeseen nähden tällöin oli	Keillä henkilöistä on luvallinen pääsy tiloihin	Palokohteen ovien, ikkunoiden ja luukkujen asennot, murtojäljet	Automaattisten paloilmottimien viestit
Missä rakennuksen kohdassa palo ilmeni ensimmäisenä	Sähkö-, lämmitys- ja työ-koneiden sekä muiden lämpöä aiheuttavien laitteiden sijainti palokohteessa	Sisäänmenotapa palokohteeseen	Aluehälytyskeskuksen pöytäkirjat
Savun ja liekkien määrä ja väri	Jäivätkö ko. laitteet jännitteellisiksi viimeisen käytön jälkeen	Sammuttamistapa ja -toimenpiteet	Rakennuspiirustukset
Mitkä kohdat rakennuksesta olivat vielä palamatta	Miten ko. laitteet ovat toimineet viime aikoina	Palokaasujen tuuletustapa	Sähköpiirustukset
Missä järjestyksessä ikkunat rikkoutuivat tai tuli läpäisi rakenteita	Milloin niitä on korjattu tai huollettu viimeksi ja missä	Esineiden siirtäminen	Kaasuputkistopiirustukset
Miten palo kehittyi tästä eteenpäin	Mitä työtä tilassa on viimeksi tehty	Palon todennäköinen syttymisalue	Erilaisten valvonta-, säätö- ym. laitteiden rekisteröimät tiedot
Tuuli- ja muut palon syttymiseen ja leviämiseen vaikuttaneet sääolosuhteet	Kuka (tai ketkä) poistui(vat) tilasta viimeisenä ennen paloa	Palon leviämistavat ja -suunnat	Tiedot sähkönjakelun katkeamisesta tai katkaisusta
Oliko paikalla muita ensihavaintoja tehneitä henkilöitä tai sellaisia henkilöitä, joilla saattaisi olla osuutta palon syttymiseen	Miten poistuttaessa lukitukset järjestettiin ja hälytyslaitteet kytkettiin		Tiedot rakennuksen puhelinliikenteestä ja siihen liittyvien puhelinkeskusten toiminnasta (tallennettava heti palon jälkeen)
			Palotapahtumiin liittyvien laitteiden ja koneiden käyttöohjeet, sähköpiirustukset ja huoltokirjat

Taulukko 2. Syttymiskohdan tutkiminen

Alustava palopaikan tutkiminen	Alustava paloskenaario	Yksityiskohtainen palopaikan tutkiminen	Palopaikan raivaus ja näytteiden ottaminen	Palopaikan ennallistaminen	Palotilanteen arviointi ja syttymiskohdan määrittäminen
Alkaa vähiten vaurioituneista alueista ja päättyy pahiten vaurioituneisiin alueisiin	Mielenkiintoiset alueet tunnistetaan hahmottamalla alustava kuva palon leviämisestä rakennuksessa	1. Ulkopuolinen tutkiminen Paloa edeltävä tilanne (vrt. taulukko 1)	Palojälkiä: Vaakaasuorien tasojen läpäisy	Työturvallisuus varmistetaan Edetään kerroksittain	Luodaan kuvitteelliset palon leviämisen tilanteet havaintojen pohjalta
Tulos on arvio palopaikan turvallisuudesta, tarvittavasta henkilöstöstä ja työvälineistä sekä alueista rakennuksessa ja sen ulkopuolella, jotka on tutkittava yksityiskohtaisesti	Sähkö ja lämmitys Palovauriot Räjähdyshälijet	Ovet ja ikkunat Palovauriot Räjähdyshälijet	Puun kuluminen palamisen aikana Hiiltyminen Kappaleiden murtuminen Hapettuminen Materiaalien sulaminen	Raivauksessa löydetty esineet ja niiden sijainti, asento ja tila kirjataan Näytteiden otto (palojätteet, epäillyt esineet, lasinsirut, muut näytteet)	Lopputuloksena arvioidaan, onko palon syttymiskohta määritettävissä käytettävissä olevan tiedon perusteella. Tutkitaan kaikki mahdolliset syttymissyyn syyt tässä kohdassa ja sen läheisyydessä
	2. Sisäpuolinen tutkiminen Paloa edeltävä tilanne (vrt. taulukko 1)	Hiiltyminen Kappaleiden murtuminen Hapettuminen Materiaalien sulaminen	Palojäljet V- ja U-jäljet Osoitin- tai nuolikuviot Pitkät jäljet		
	3. Palotapahtumien ajallinen kulku	Lämpölaajeneminen ja materiaalien muodonmuutokset Savu ja noki Ikkunalasit ja sirpaleiden sijainti			

Taulukko 3. Syttymissyy

Syttymislähde	Ensiksi syttyvä aine	Syttymissyy	Tavanomaisia syttymissyitä
Energianlähde, laite, aine tai tilanne joka on voinut aiheuttaa syttymisen	Syttymislähteestä energia siirtyy sitä lähellä olevaan aineeseen ja sytyttää tämän	Syttymislähde tai polttoaine yksinään ei pysty sytyttämään tulipaloa, vaan näiden yhdistelmä johtaa tulipaloon	1. Tahallinen sytyttäminen 2. Lämmittäminen 3. Ruoanlaitto 4. Valaistus 5. Sähkötekniset syyt:
Energialähteen on kyettävä tuottamaan ja siirtämään riittävästi energiaa ympärillä olevaan polttoaineeseen sen sytyttämiseksi	Aine voi olla: <ul style="list-style-type: none"> • syttymislähteen osa • syttymislähteen välittömässä läheisyydessä • kaasu • höyry 	Selvitetään, mitkä olosuhteet ja tapahtumat ovat voineet esiintyä syttymistapahtumassa ja missä aikajärjestyksessä	<ul style="list-style-type: none"> • Oiko- ja maasulut, valokaaret • Liitoskohdan huono kosketus • Ylikuormitus • Staattinen sähkö, salama 6. Väärin käytetyt sähkölaitteet 7. Laitteviat <ul style="list-style-type: none"> • vialliset sähkölaitteet • kitka 8. Palavien kaasujen ja nesteiden jakeluverkkojen ja laitteiden viat ja vuodot 9. Avoimet liekit ja kipinät <ul style="list-style-type: none"> • tulityöt • kynttilät 10. Tupakointi <ul style="list-style-type: none"> • savukkeet • tulitikut 11. Itsesytyminen tai sytyminen kuumasta kappaleesta 12. Kemialliset reaktiot 13. Tuuli, sade, tulvavesi 14. Eläimet 15. Auringonvalo



Tekijä(t) Mangs, Johan Keski-Rahkonen, Olavi	Projektin nimi Uudet tutkimusmenetelmät palonsyyn tutkimuksessa	
	Toimeksiantaja(t) Palosuojelurahasto, Palotutkimusraati, sisäasiainministeriön poliisiosasto	
Nimeke Palonsyyn selvittäminen 1 Oppikirja, osa 1		
Tiivistelmä <p>Tässä palonsyyn oppikirjassa on kerätty alan runsaasta kirjallisuudesta ja kirjoittajien omasta kokemuspöiristä tietoa, jonka perusteella palonsyytä tutkitaan erilaisista näkökulmista. Koska asia on hyvin laaja-alainen, useat lähestymistavat ovat mahdollisia. Siksi tässä on pitäydytty käyttämään vain laajalti tunnustettuja lähteitä, jotka ovat peräisin luotettavista asiantuntijaorganisaatioista, tai alan sarjajulkaisuista, joissa julkaistut artikkelit on alistettu ennakolta riippumattomien palotieteen asiantuntijoiden tarkastettaviksi yleisen luonnontieteissä käytetyn periaatteen mukaisesti. Erityisesti on pyritty huolehtimaan siitä, että palon luonnontieteellinen puoli tulee aina esille selvästi, ja vain todennettuihin ilmiöihin perustuen. Yksityiskohtien tarkastamista varten kirjassa on laaja lähdeluettelo, johon tekstissä viitataan. Oppikirja on jaettu kahteen osaan, jotka julkaistaan eri niteinä.</p> <p>Tämän osan ensimmäinen luku käsittelee lainsäädännöllisiä asioita ja siinä on esitetty lyhyesti palonsyöntutkimuksen juridiset perusteet Suomessa. Toisessa luvussa käsitellään suppeasti tulipaloissa tapahtuvia luonnontieteellisiä ilmiöitä eli palon fysiikkaa ja kemiaa. Kolmas luku koskettelee palopaikan dokumentointia ja näytteenottoa palojäännöksistä. Neljännessä luvussa keskitytään melko laajasti tärkeään syttymiskohdan etsimiseen ja tutkimiseen. Luvussa viisi paneudutaan syttymissyiden selvittämiseen. Luku kuusi käsittelee palon kehittymistä rakennuksessa ja palojen rekonstruktioita sekä numeerisin että fyysisin menetelmin. Luvussa seitsemän kuvataan ajoneuvopalojen ja luvussa kahdeksan kaasupalojen tutkintaa. Luku yhdeksän esittelee räjähdyksiä, luku kymmenen maastopaloja ja luku yksitoista palokuolemia tilastojen, kuolinsyiden selvittelyn ja palokuolemien tutkimuksen kannalta. Lopussa on laaja lähdeluettelo luotettavaan alan kansainväliseen kirjallisuuteen. Liitteeksi on taulukoitu muistilista palonsyyn selvittämisen tueksi.</p>		
Toimintayksikkö VTT Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka, talo- ja palotekniikka, Kivimiehentie 4, PL 1803, 02044 VTT		
ISSN ja avainnimeke 1235-0605 VTT TIEDOTTEITA - MEDDELANDEN - RESEARCH NOTES		
ISBN 951-38-5172-9	Kieli suomi	
Luokitus (UDK) 614.841(075)	Avainsanat fires, fire ignition, fire damage, fire investigation, textbooks	
Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	Sivuja 284 s. + liitt. 4 s.	Hintaryhmä F

VTT TIEDOTTEITA – MEDDELANDEN – RESEARCH NOTES

VTT RAKENNUSTEKNIikka – VTT BYGGNADSTEKNIK –
VTT BUILDING TECHNOLOGY

- 1815 Weckman, Henry. Rakennusten poistumisteitä koskevat määräykset eri maissa. 1997. 54 s. + liitt. 12 s.
- 1823 Hakkarainen, Tuula, Oksanen, Tuuli & Mikkola, Esko. Fire behaviour of facades in multi-storey wood-framed houses. 1997. 42 p. + app. 16 p.
- 1828 Kouhia, Ilpo & Nieminen, Jyri. IEA5-aurinkotalo. 1997. 26 s. + liitt. 5 s.
- 1829 Määttä, Jukka & Kaunisto, Tuija. Pientalojen talousvesiverkoston vuotovahingot. 1997. 42 s. + liitt. 4 s.
- 1832 Kärki, Satu & Hyvärinen, Juhani. Ilmastointikoneen suorituskyvyn seuranta. 1997. 44 s.
- 1834 Kokkala, Matti, Mikkola, Esko, Immonen, Matti, Juutilainen, Hemmo, Manner, Petri & Parker, William J. Large-scale upward flame spread tests on wood products. 1997. 29 p. + app. 116 p.
- 1836 Häkkinen, Tarja, Vares, Sirje, Vesikari, Erkki, Saarela, Kristina, Tattari, Kai & Säteri, Jorma. Rakennusmateriaalien ja -tuotteiden ympäristövaikutukset ja niiden arviointiperusteet. 1997. 138 s. + liitt. 10 s.
- 1844 Pietarinen, Petri, Honkanen, Timo & Hyvärinen, Juhani. Älykkyyden hajauttaminen LVIS-järjestelmien automaatiassa. HAJAÄLY-projektin loppuraportti. 1997. 106 s. + liitt. 6 s.
- 1845 Karhu, Vesa, Keitilä, Matti & Lahdenperä, Pertti. Construction process model. Generic present-state systematisation by IDEF₀. 1997. 190 p.
- 1846 Weckman, Henry. Rakennuksista poistumisen laskennallinen arviointi. 1997. 50 s. + liitt. 11 s.
- 1849 Kiviniemi, Markku. Korjaushankkeen laatusuunnitelmat. 1997. 167 s.
- 1851 Sarja, Asko, Tiuri, Ulpu & Miekkala, Soili. Eurooppa-talo, Europahouse, Europa-Huis, Europa-Haus. 1997. 38 s. + liitt. 70 s.
- 1859 Pietarinen, Petri & Saari, Mikko. Ilmanvaihtolämmityksen hajautettu automaatio. 1997. 47 s.
- 1861 Tarvainen, Veikko & Hukka, Antti. Sahatavaran kierouden vähentäminen kuivauksen keinoin. Esiselvitys. 1997. 36 s.
- 1864 Ala-Outinen, Tiina & Oksanen, Tuuli. Stainless steel compression members exposed to fire. 1997. 41 p. + app. 17 p.
- 1866 Hukka, Antti. Sahatavaran kamarikuivauskaavojen optimointi LAATUKAMARI-simulointiohjelmalla. 1997. 27 s. + liitt. 2 s.
- 1867 Perälä, Anna-Leena. Round small diameter timber for construction market in Finland. 1997. 33 p. + app. 12 p.
- 1868 Vesikari, Erkki, Tirkkonen, Timo, Häkkä-Rönholm, Eva & Markelin, Lina. Siltojen kunto, kantavuus ja käyttöikä. 1997. 227 s.
- 1869 Kokko, Erkki, Ojanen, Timo & Salonvaara, Mikael. Uudet vaipparakenteet. Energian säästö ja kosteustekniikka. 1997. 90 s.
- 1870 Ojanen, Tuomo, Kokko, Erkki, Salonvaara, Mikael & Viitanen, Hannu. Havuvanerirakenteiden kosteusteknisen toiminnan perusteet. 1997. 90 s. + liitt. 2 s.
- 1871 Hekkanen, Martti, Kauppinen, Timo & Santalo, Maria. Matalaenergiapientalon toteuttaminen korjausrakentamalla. Tusina, Oulainen. 1997. 64 s.
- 1872 Andstén, Tauno & Weckman, Henry. Sammutteiden identifiointi. Osa 1. Sammutteijauheet. 1997. 41 s. + liitt. 16 s.
- 1873 Mangs, Johan & Keski-Rahkonen, Olavi. Palonsyyn selvittäminen 1. Oppikirja, osa 1. 1997. 284 s. + liitt. 4 s.
- 1874 Mangs, Johan & Keski-Rahkonen, Olavi. Palonsyyn selvittäminen 2. Oppikirja, osa 2. 1997. 120 s.
- 1875 Mangs, Johan & Keski-Rahkonen, Olavi. Palonsyyn selvittäminen 3. Toiminta palopaikalla. 1997. 61 s. + liitt. 4 s.

