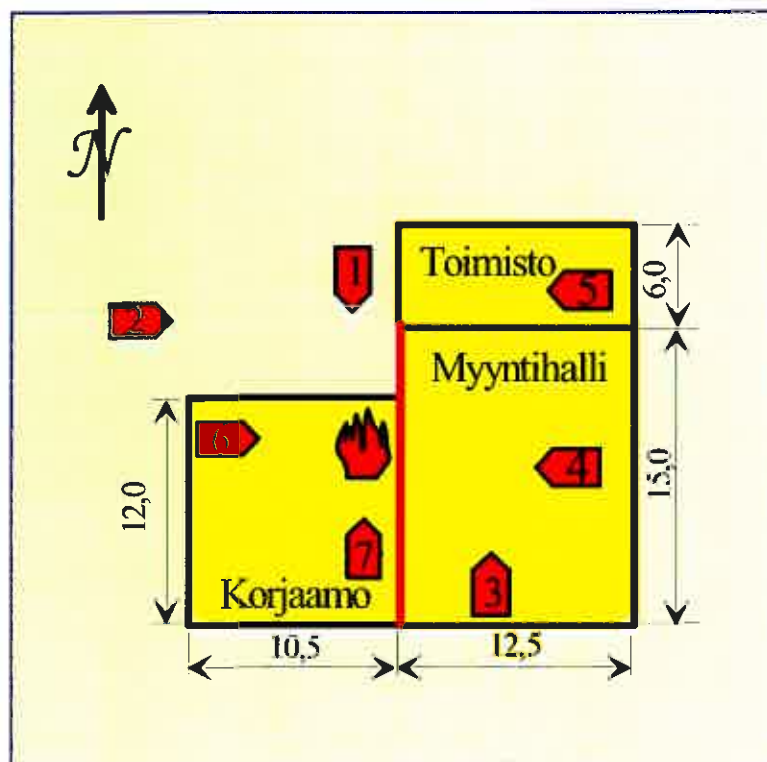


Johan Mangs & Olavi Keski-Rahkonen

Palonsyyn selvittäminen 2

Oppikirja, osa 2



Palonsyyn selvittäminen 2

Oppikirja, osa 2

Johan Mangs & Olavi Keski-Rahkonen

VTT Rakennustekniikka



ISBN 951-38-5173-7

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 2. Oppikirja, osa 2. Espoo 1997, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1874. 120 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 kokemuksesta 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 alustettu 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.

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

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 paloilmiöistä 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 tutkinnan 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 tutkinnan kannalta. Lopussa on laaja lähdeluettelo luotettavaan alan kansainväliseen kirjallisuuteen. Liitteeksi on taulukoitu muistilista palonsyyn selvittämisen tueksi.

Oppikirjan toisessa osassa esitetään palavien aineiden ominaisuuksia, laboratorio-menetelmiä, 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”.

Rikoskemisti Niina Viitala Keskusrikospoliisista on kirjoittanut kirjan toisen osan kohdat 2.1 ja 2.2 ja fil. maist. Matti Hirvensalo Borealis Polymers Oy:stä kohdat 4.3.1 ja 4.3.2. Näihin teksteihin kanssa mainitut tekijät ovat tehneet joitakin, pääasiassa toimituksellisia muutoksia.

Työtä ovat rahoittaneet sisäasiainministeriön poliisiosasto ja Palosuojelurahasto, Palotutkimusraati sekä VTT. Projektin johtoryhmään ovat kuuluneet ylikomisario Erkki Haaksiluoto (Sisäasiainministeriön poliisiosasto, puheenjohtaja), ylininööri 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 Palopäälystöliitto 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, avustaneita kirjoittajia ja kollegoitamme VTT Rakennustekniikassa hyvistä neuvoista, käytännön avusta ja rohkaisusta. Samoin olemme kiitollisia kirjan lukijoilta tulevasta palautteesta, sekä kritiikistä että parannusehdotuksista.

Espoossa lokakuussa 1997

Tekijät

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
ALKUSANAT.....	4
1. PALAVIEN AINEIDEN OMINAISUUKSIA.....	8
1.1 PALAVAT NESTEET JA KAASUT.....	8
1.2 PÖLYT.....	8
1.2.1 Yleistä.....	8
1.2.2 Pölyräjähdysten teoriaa.....	9
1.2.3 Pölyn räjähtämiseen vaikuttavat tekijät.....	12
1.2.4 Pölyn syttyminen.....	16
1.2.5 Pölyräjähdysten testausmenetelmät.....	19
1.2.6 Pölyjen räjähdysvaaraluokittelu.....	19
1.3 AINEIDEN LÄMPÖTEKNISIÄ OMINAISUUKSIA.....	20
2. LABORATORIOMENETELMÄT.....	25
2.1 KAASUKROMATOGRFIA.....	25
2.2 MASSASPEKTROMETRIA.....	28
2.3 KARTIOKALORIMETRI.....	30
3. SÄHKÖJOHTOJEN JA -KYTKIMIEN VAURIOIDEN TUTKIMISEN KIRJALLISUUSKATSAUS.....	32
3.1 KUPARIN METALLIOPPI TAUSTATIETONA.....	32
3.1.1 Mikrorakenne.....	32
3.1.2 Sulaminen ja jäähtyminen.....	32
3.1.3 Uudelleenlämmittäminen jähmettymisen jälkeen.....	33
3.1.4 Oksidin poistuminen.....	33
3.1.5 Pohdiskelua.....	33
3.1.6 Uudelleenkiteytyminen.....	33
3.1.7 Silmämääräiset havainnot makrorakenteesta.....	34
3.2 YLEISTÄ POHDINTAA SÄHKÖPALOISTA.....	36
3.3 ALUMIININ JA KUPARIN VUOROVAIKUTUKSEN AIHEUTTAMAT JÄLJET.....	36
3.4 OIKOSULUT, MAASULUT JA VALOKAARET.....	38
3.4.1 Oikosulut ja maasulut.....	38
3.4.2 Epätäydellinen oikosulku vastuksen kautta.....	38
3.4.3 Valokaari.....	38
3.4.4 Ensi- ja toissijaisten valokaarijälkien tutkiminen Augerelektronispektroskopiolla.....	39
3.4.5 Muita tutkimuksia.....	40
3.5 KUUMAT LIITOKSET.....	46
3.6 KAAPELEIHIN LYÖDYT NAULAT.....	47

4. TULIPALOJEN KUVAUKSIA	48
4.1 ASUNTOPALOJA	48
4.1.1 Järvenpään huoneistopalo.....	48
4.1.2 Sähkövian aiheuttama huoneistopalo	49
4.1.3 Valaisimen aiheuttama huoneistopalo	53
4.2 AJONEUVOPALOJA	57
4.2.1 Henkilöautojen palokokeet.....	57
4.3 TEHDASPALOJA.....	64
4.3.1 Sähköisen vian aiheuttama hanatehtaan palo	64
4.3.2 Oikosulun aiheuttama kengänpohjatehtaan tehdashallin palo.....	66
4.3.3 Salaman aiheuttama paloaseman palo	69
4.4 MUITA SUURIA TULIPALOJA.....	71
4.4.1 King's Crossin metroaseman palo.....	71
4.4.2 Scandinavian Star -laivan palo	75
4.4.3 Dupont Plaza Hotel and Casino.....	79
4.4.4 Syttymishetken määrittäminen	81
4.4.5 Pepcon Plant	85
4.5 SUOMESSA SATTUNEITA MERKITTÄVIÄ TULIPALOJA.....	86
4.5.1 Hanasaaren turbiinihallin palo.....	86
4.5.2 Kuusankosken hakekuljettimen palo	87
4.5.3 Hotelli Heinolanhovin nestekaasuräjähdytys	87
4.5.4 Kokkolan säiliöaluepalo	88
4.5.5 Nesteen säiliöpalo.....	90
4.5.6 Luettelo merkittävistä tulipaloista	94
5. PALONSYYN SELVITTÄMISEN KIRJALLISUUTTA	102
5.1 KIRJAT	102
5.2 RAPORTTISARJA- JA VASTAAVAT JULKAISUT	105
5.3 LEHTIARTIKKELIT	106
5.3.1 Sähköiset syyt.....	106
5.3.2 Muut aiheet.....	107
5.4 TUTKITTUJA TAPAUKSIA.....	109
LÄHDELUETTELO	113
HAKEMISTO.....	119

1. PALAVIEN AINEIDEN OMINAISUUKSIA

1.1 PALAVAT NESTEET JA KAASUT

Kauppa- ja teollisuusministeriö on laatinut luettelon yleisimmistä palavista nesteistä ja eräitä niiden ominaisuuksia.

Luettelossa on mm. nesteiden tai kaasujen leimahduslämpötila, itsesyttymislämpötila, syttymis(räjähdyks)rajat, nesteen ja höyryn tiheys sekä kiehumislämpötila. Luettelo on esimerkiksi seuraavissa SFS-käsikirjoissa:

SFS-käsikirja 39. Palavat nesteet ja öljylämmityslaitokset. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto, 1986. 2. painos. 497 s.

SFS-käsikirja 59. Räjähdyksvaarallisten tilojen luokittelu. Palavat nesteet ja kaasut. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto, 1984. 1. painos. 108 s.

1.2 PÖLYT

Oppikirjan ensimmäisessä osassa pölyräjähdyksiä on käsitelty vain lyhyehkösti. Koska nämä tapaukset ovat melko yleisiä ja niiden seuraukset voivat olla merkittäviä, tässä on tarkasteltu pölyräjähdyksiä ja niihin vaikuttavia tekijöitä hieman laajemmin. Tiivis suomenkielinen esitys pölyjen palo- ja räjähdysominaisuuksista on esitetty SFS-käsikirjassa 60 (1984).

1.2.1 Yleistä

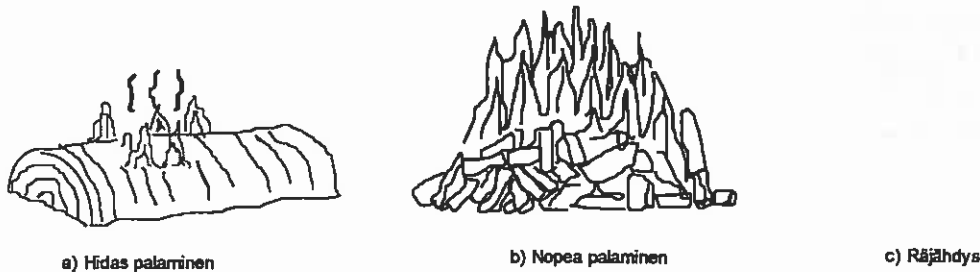
Pölyräjähdyksiä on sattunut teollisen toiminnan yhteydessä yli kahden vuosisadan ajan. Muutamat niistä ovat olleet hyvin tuhoisia, ja niissä on kuollut tai loukkaantunut monia henkilöitä ja tuhoutunut paljon omaisuutta. Faraday epäili jo vuonna 1844, että hiilipöly saattaisi olla räjähtävää, mutta vasta vuosisadan loppuun mennessä voitiin suorilla kokeilla osoittaa, että orgaaniset pölyt ja metallipölyt syttyivät räjähtäen. Kaksikymmentäluvulla voitiin kvantitatiivisesti osoittaa pölyn hiukkaskoon vaikutus räjähdysominaisuuksiin. Kolmekymmentäluvun loppuun mennessä voitiin pölyräjähdyksistä luoda ensimmäinen karkea teoreettinen kuva, joka pitää pääpiirtein paikkansa nykytiedonkin valossa. Pölyräjähdyksen testauslaitteita eri tutkijat kokeilivat yli puolen vuosisadan ajan. Nykyisin käytössä olevat menetelmät ovat peräisin lähes kokonaan toisen maailmansodan jälkeiseltä ajalta (Bartknecht 1987).

Pölyräjähdyksen teoriasta hyvän yleisesityksen antaa Nagyn ja Verakisin teos (1983). Mainittu Bartknechtin teos ja sen myöhempi englanninkielinen täydennetty laitos ovat klassikkoja pölyräjähdyksen testausmenetelmien kehittämisen kuvauksessa. Eckhoffin (1991) käsikirjamainen teos on laajin yhtenäinen esitys pölyräjähdyksien koko kentästä ja mainio johdatus alan erikoiskirjallisuuteen 1980-luvun loppuun saakka.

1.2.2 Pölyräjähdysten teoriaa

Pölyräjähdyksessä palava aine yhtyy nopeasti happeen tuottaen oksideja ja energiaa. Kuten muuhun palamiseen sen syntymiseen tarvitaan riittävä pitoisuus *polttoainetta ja happea* sekä riittävä *lämpötila*. Pölypilvessä palo etenee syttymiskohdasta pallomaisena ellei kohtaa esteitä. Jos palamisnopeus on riittävä, syntyy suuria määriä kuumia palokaasuja, jotka kykenevät nostamaan suljetun tilan painetta niin huomattavasti, että rakenteet vaurioituvat. Pölyräjähdystä voidaan torjua vaikuttamalla johonkin edellä mainituista tekijöistä joko vähentämällä polttoainetta ja/tai happea sekä alentamalla lämpötilaa.

Miksi pöly on räjähtävää? Jähmeän aineen palaessa lähes kaikki siinä tapahtuvat reaktiot ovat verrannollisia palavan kohteen kokonaispinta-alaan. Kun kappaletta jaetaan pienempiin osiin, sen pinta-ala kasvaa. Siten myös sen palamisreaktioiden nopeus kasvaa, jos aine pannaan palavaan ympäristöön. 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 jakamista jatketaan edelleen 10 μm :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, kuva 1.1.

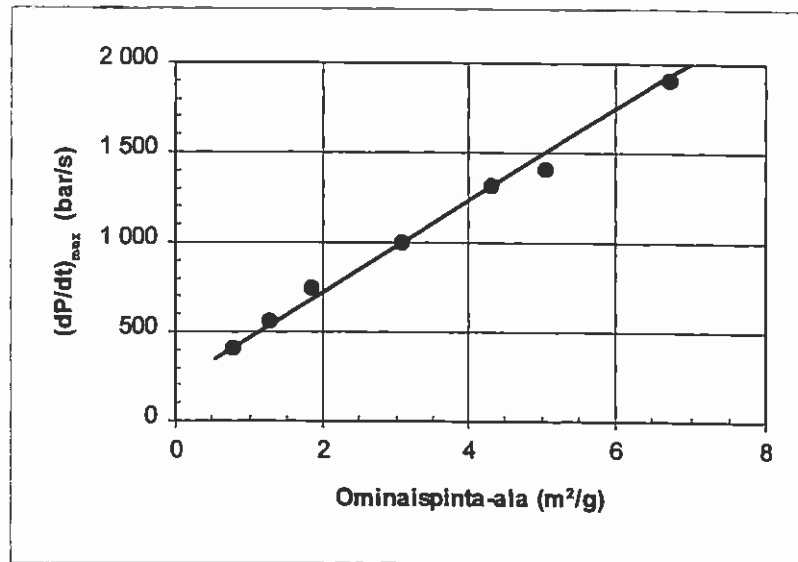


Kuva 1.1. Palamisnopeuden riippuvuus polttoaineen hiukkaskoosta (Eckhoff 1991).

Pölyräjähdysten maksimipaineennousunopeus $(dp/dt)_{\max}$ riippuu suoraviivaisesti pölyn ominaispinta-alasta, millä tarkoitetaan pölyhiukkasen keskimääräistä pinta-alaa jaettuna hiukkasen massalla. Pölyn ominaispinta-ala σ on kääntäen verrannollinen hiukkasten läpimittaan d . Pallomaisille ja kuutiomaisille hiukkasille

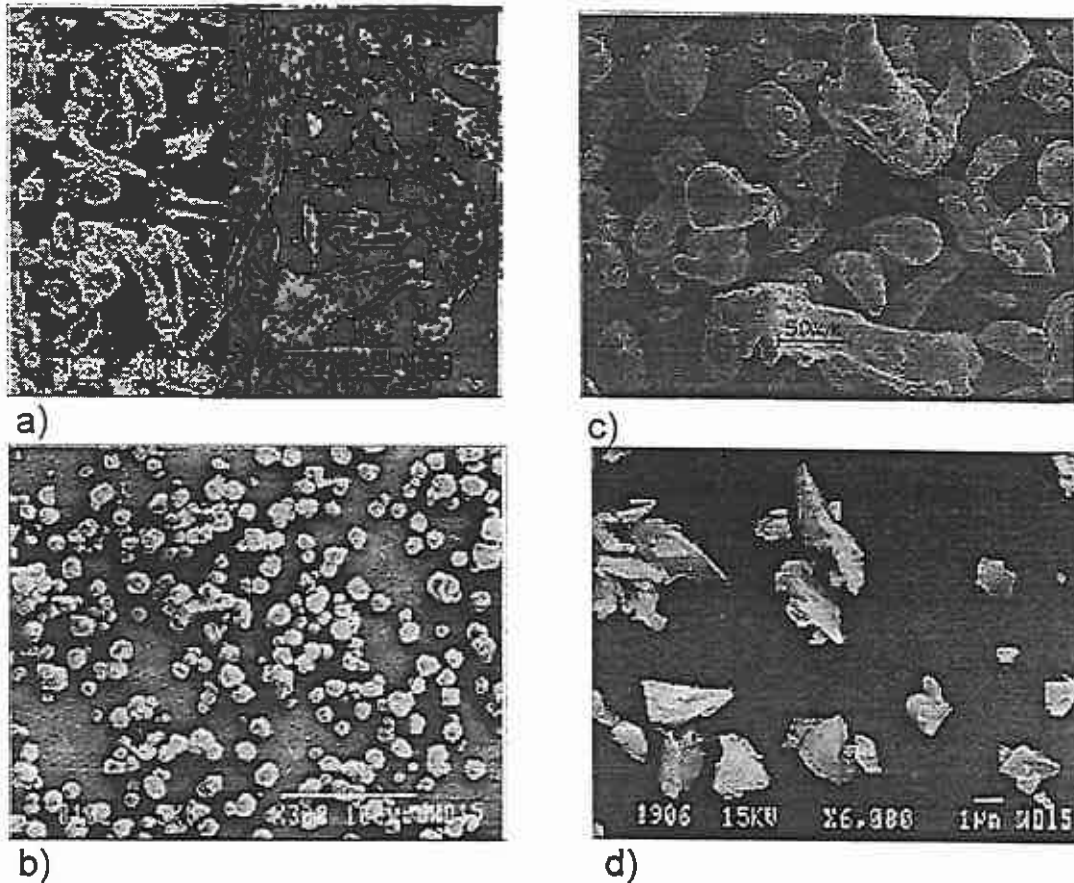
$$\sigma = 6 / \rho d \quad (1)$$

missä ρ on hiukkasen tiheys. Kuvasta 1.2 ilmenee, että alumiinipölylle erilaisilla ominaispinta-aloilla mitatut pölyjen suurimmat paineennousunopeuden mittauspisteet sattuvat virherajojen puitteissa suoralle viivalle (Eckhoff 1991).



Kuva 1.2. Maksimipaineennousunopeuden riippuvuus pölyn ominaispinta-alasta (Eckhoff 1991).

Todellinen pöly muodostuu erimassaisista, muodoltaan erilaisista ja pinta-alaltaan suuresti vaihtelevista hiukkasista. Pölyhiukkasten keskihalkaisija vaihtelee karkeista silminnähtävistä rakeista aina nanometrialueen hiukkasiin. Kuvassa 1.3 on esimerkkinä elektronimikroskooppikuvia muutaman eri aineen pölyistä. Hiukkas-kokojakauma saattaa vaihdella hyvinkin paljon eri pölyillä. Tässä keskitytään hienojakoiseen pölyyn, koska keskimääräisesti karkeasta pölystä sitä käsiteltäessä saattaa erkautua kaikista hienoin jae, joka sopivassa tilanteessa räjähtäessään aiheuttaa voimakkaamman räjähdyskuksen kuin hiukkasten keskikokoa edustava näyte olisi aiheuttanut.



Kuva 1.3. Elektronimikroskooppikuvia erilaisista pölyistä: a) puu-, b) maissi-tärkkelys-, c) alumiini- ja d) piipöly (Eckhoff 1991).

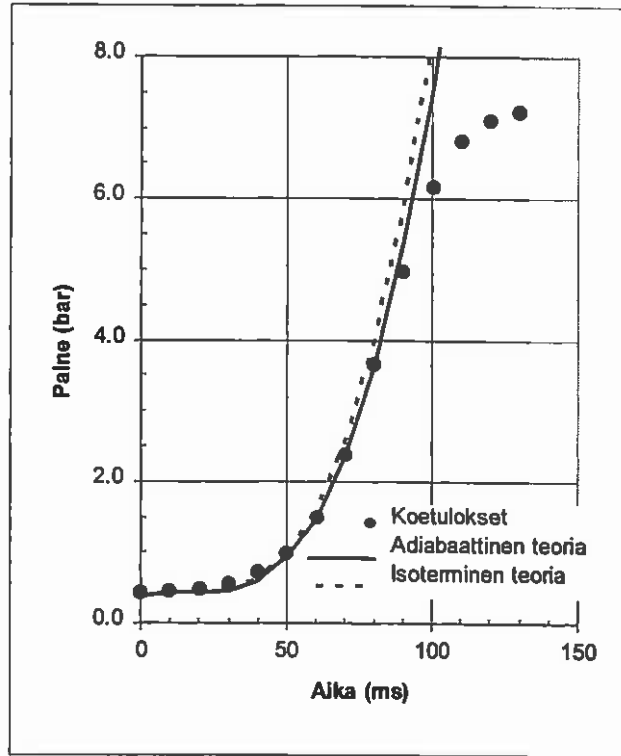
Pölyräjähdys etenee suljetussa astiassa paikoillaan olevassa pölypilvessä pallomaisesti syttymispisteestä kaikkiin suuntiin tasaisella nopeudella v . Nopeus riippuu paineesta P ja lämpötilasta T_v seuraavasti

$$v = k_r \left(\frac{T_v}{T_r}\right)^2 \left(\frac{P_r}{P}\right)^\beta \quad (2)$$

missä k_r , T_r ja P_r ovat nopeus, absoluuttinen lämpötila ja paine referenssiolosuhteissa sekä β laaduton vakio rajoissa 0,1 ... 0,5. Kokeellisesti on havaittu, että räjähdyspaine P ajan t funktiona on laskettavissa räjähdysalkuvaiheissa kaavalla

$$P = P_0 \left(1 + \frac{K}{V} k_r^3 t^3\right) \quad (3)$$

missä K on vakio ja V säiliön tilavuus. Kuvassa 1.4 on esitetty räjähdyspaine ajan funktiona 3,1 m³:n suorakulmaisessa astiassa. Paine poikkeaa kuutioparaabelikasvusta räjähdysalkuvaiheessa kun astian seinämien jäähdyttävä vaikutus alkaa olla merkittävä.



Kuva 1.4. Paine suorakulmaisessa 3,1 m³:n astiassa ajan funktiona. Pisteet mitattuja arvoja ja viivat eri teorioilla laskettuja arvoja (Nagy ja Verakis 1983).

Kuutiojuurilaki. Testattaessa pölyjen räjähdystä erikokoisissa säiliöissä on havaittu karkeasti, että räjähdystilan tilavuuden V vaikutus voidaan skaalata kuutiojuurilla

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max} V^{\frac{1}{3}} = K_{st} \quad (4)$$

missä $(dp/dt)_{\max}$ on maksimipaineen nousunopeus ja K_{st} pölylle ominainen vakio, joka määritetään kohdassa 1.2.5 kuvatuilla standardimenetelmillä. Tätä lakia soveltaen voidaan arvioida pölyräjähdysten vaikutus erisuuruissa huone- ym. tiloissa ja mitoittaa paineenkestävät rakenteet sekä paineenkevennysaukot.

1.2.3 Pölyn räjähtämiseen vaikuttavat tekijät

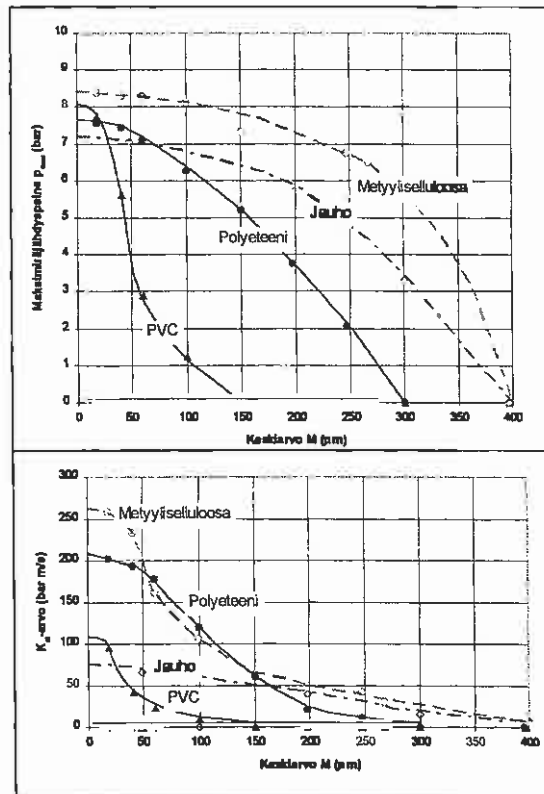
Pölyn teoreettinen energiasisältö on suoraan verrannollinen pölyn kokonaismassaan. Pölyjen lämpöarvot ovat muiden palavien aineiden tavoin haarukassa 10 ... 40 MJ/kg. Pölyräjähdyksessä pölystä vapautuvaa energiaa ei niinkään määrää sen sisältämä kokonaisenergiämäärä vaan lähes suljetussa räjähdystilassa käytettävissä oleva happimäärä. Ihannekaasulaista näemme, että tilavuudessa V , absoluuttisessa lämpötilassa T ja paineessa p olevan kaasun moolimäärä ν on

$$\nu = \frac{pV}{RT} \quad (5)$$

missä R on yleinen kaasuvakio. Soveltaen kaavaa (5) ilmaan, tästä moolimäärästä on 21 % happea. Näemme, että hapen määrä on suoraan verrannollinen lähtötilanteen paineeseen ja kääntäen verrannollinen absoluuttiseen lämpötilaan.

Hapenkulutuskalorimetrian mukaan täydellisessä palamisessa vapautuu energiaa 3 MJ käytettyä ilmakilogrammaa kohden. Siten nyrkkisääntönä voidaan sanoa, että kuutiometriä kohden normaalitilaista ilmaa vapautuu 4 MJ energiaa. Jos alkutilan paine ja lämpötila poikkeavat normaalista, vapautuva suurin energiamäärä lasketaan ihannekaasun tilanyhtälön mukaisesti tilassa käytettävissä olevasta happimäärästä. Karkeasti ottaen itse pölyn energiasisältö ei ole räjähdyksessä yhtä ratkaiseva kuin tilassa oleva happimäärä.

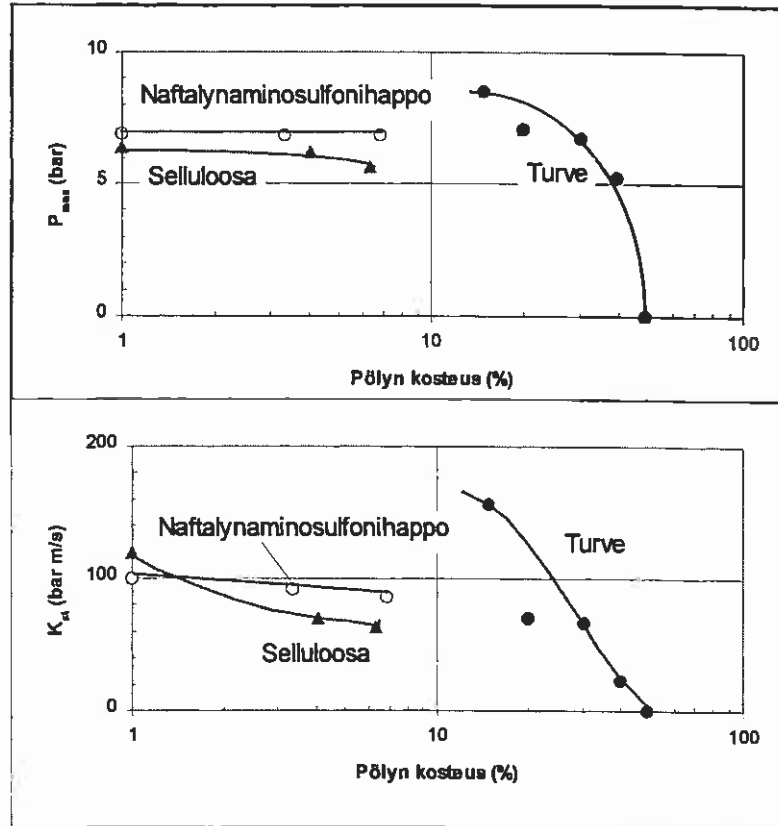
Pölyräjähdysten voimakkuuden kannalta pölyn hiukkaskoko on aivan ratkaiseva, kuten jo kohdassa 1.2.2 ja kuvassa 1.1 esitettiin. Kuvassa 1.5 on muutamien pölytyyppien maksimiräjähdyspaineen ja maksimipaineennousunopeuden riippuvuus hiukkasen keskihalkaisijasta. Kuvasta 1.5 ilmenee, että hiukkaskoon ollessa pienempi kuin $60 \mu\text{m}$ räjähdysten voimakkuus ei enää kasva vaan saavuttaa vakioarvon. Kun hiukkasten koko ylittää $200 \dots 500 \mu\text{m}$, aine ei enää yleensä räjähdä.



Kuva 1.5. Maksimiräjähdyspaineen ja K_{st} -arvon riippuvuus hiukkasen keskihalkaisijasta jauho-, metyyliselluloosa-, polyetyyleeni- ja PVC-pölylle (Bartknecht 1987).

Hiukkaskoon vaikutus pölyn räjähdysominaisuuksiin on kvalitatiivisesti ymmärrettävissä palamismallilla. Suurilla hiukkasilla ominaispinta-ala pienenee. Yksityinen hiukkanen ei ehdi palaa loppuun räjähdysten kuluessa ja siten vapautunut energiamäärä jää vain osaksi suurimmasta mahdollisesta energiasta. Pienillä hiukkasilla räjähdysten kulun aikana jähmeä ainehito ehtii kuumeta kylliksi, jotta palaminen tapahtuisi täydellisesti. Kun kaikki energia vapautuu, räjähdysten voimakkuus ei enää kasva, vaikka hiukkaskoko pienenesi.

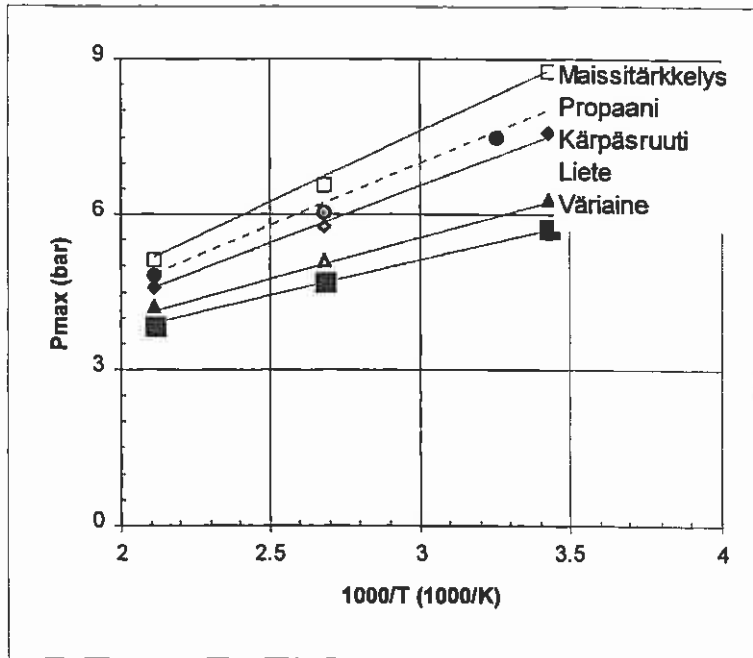
Kosteaa polttoainetta palaa yleisesti ottaen huonommin kuin kuiva, koska siinä oleva vesi höyrystyy palamisen aikana. Veden höyrystymislämpö on huomattava, ja tämä energia otetaan palokaasujen ja polttoaineen lämmittämiseen muuten käytettävästä energiamäärästä. Kuvassa 1.6 näkyy kolmen erilaisen pölyn maksimipaineen ja K_{st} -arvon riippuvuus tuotteen kosteuspitoisuudesta. Pienillä kosteuksilla vaikutus on mitätön, mutta suuremmilla arvoilla räjähdys sammuu kokonaan, kuten kuvan 1.6 tapauksessa turvenäytteelle käy.



Kuva 1.6. Maksimipaineen ja K_{st} -arvon riippuvuus näytteen kosteuspitoisuudesta (Bartknecht 1987).

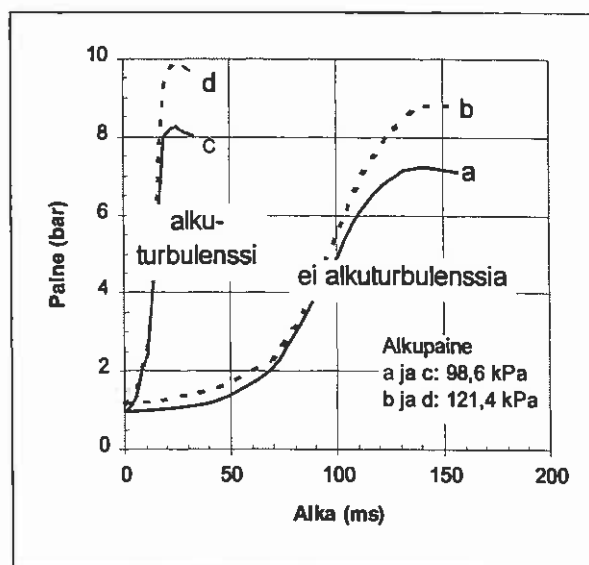
Koska teollisuudessa valmistetaan ja kuljetetaan pölyjä korkeissakin lämpötiloissa, on tiedettävä pölyräjähdysvaaran riippuvuus lämpötilasta. Kuvassa 1.7 on maksimiräjähdyspaineen riippuvuus absoluuttisen lämpötilan käänteisarvosta muutamalle pölylle. Niissä maksimiräjähdyspaine kasvaa lineaarisesti verrannollisena absoluuttisen lämpötilan käänteisarvoon. Sama ilmiö havaitaan myös räjähtävillä kaasuilla. Syykin on sama. Räjähdys on sitä voimakkaampi, mitä enemmän tilassa on käytettävissä happea. Sen määrä riippuu ihannekaasulain mukaan kääntäen lämpötilasta.

Räjähdystilan muodon vaikutus räjähdysvoimakkuuteen on vaikeasti arvioitavissa, koska monenlaiset eri seikat vaikuttavat lopputulokseen. Mitä monimutkaisempi ja sokkeloisempi räjähdystila, sitä voimakkaampi räjähdys. Tämä aiheutuu pääasiassa siitä, että räjähdysaallon kohdattua esteitä, nämä aiheuttavat virtauksiin lisää pyörteitä, ja se kiihdyttää räjähdystä.



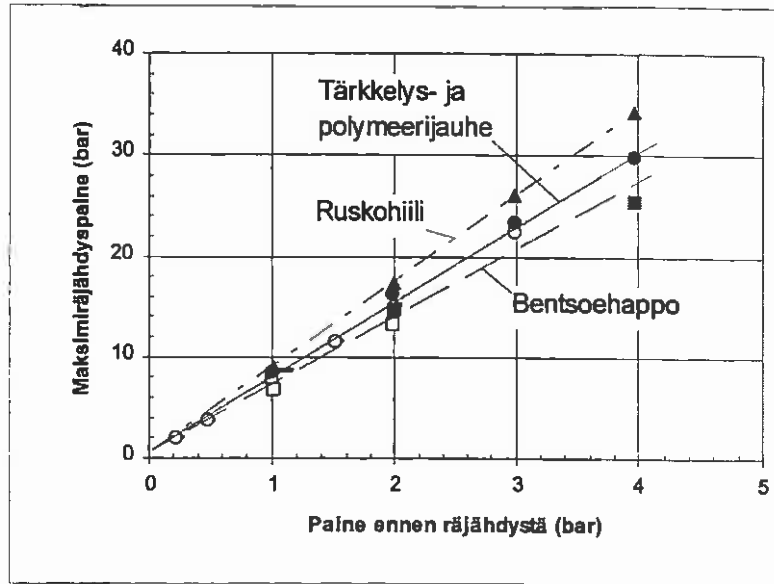
Kuva 1.7. Maksimiräjähdyspaineen riippuvuus lämpötilasta (Bartknecht 1987).

Turbulenssin eli alkutilanteen pyörteisyyden vaikutus räjähdysen kulkuun on merkittävä. Turbulenssi lisää sekoittumista ja siten hapen kuljettumista palavan hiukkasen läheisyyteen. Turbulenssi nopeuttaa räjähdystä, kuten ilmenee kuvasta 1.8, missä maksimipaine saavutetaan noin neljä kertaa nopeammin turbulentsissa pölypilvessä laminaariin pölypilven verrattuna.



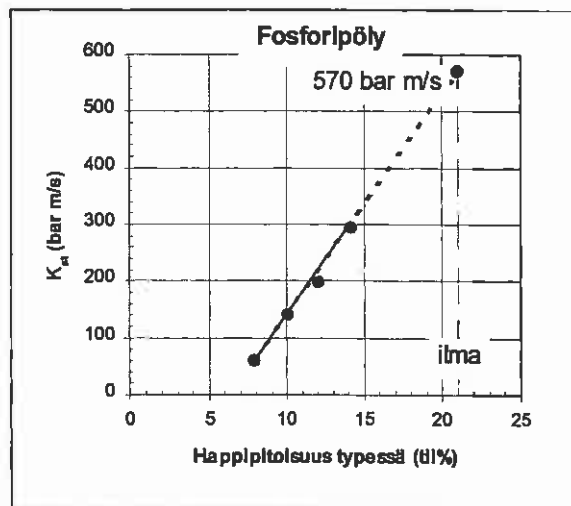
Kuva 1.8. Turbulenssin vaikutus räjähdysen kulkuun (Nagy ja Verakis 1983).

Räjähdysspaine ja K_{st} -arvo riippuvat suoraan alkutilan paineesta, kuten ilmenee kuvasta 1.9. Syy on sama kuin lämpötilariippuvuuden kohdalla mainittiin: korkeammassa paineessa samaan tilavuuteen saadaan enemmän happea ja siten siellä on mahdollista vapautua enemmän energiaa.



Kuva 1.9. Maksimiräjähdyspaineen riippuvuus alkutilan paineesta (Eckhoff 1991).

Edellä mainitun perusteella on selvää, että happipitoisuus vaikuttaa pölyräjähdysten voimakkuuteen ratkaisevasti. Kuvassa 1.10 on esitetty fosforipölyn maksimipaineen ja K_{st} -arvon riippuvuus hapen määrästä ilmaa pienemmillä pitoisuuksilla (Bartknecht 1987). Nytkin havaitaan lähes lineaarisia riippuvuuksia, kuten hapenkulutuksen perusteella on odotettavissa.



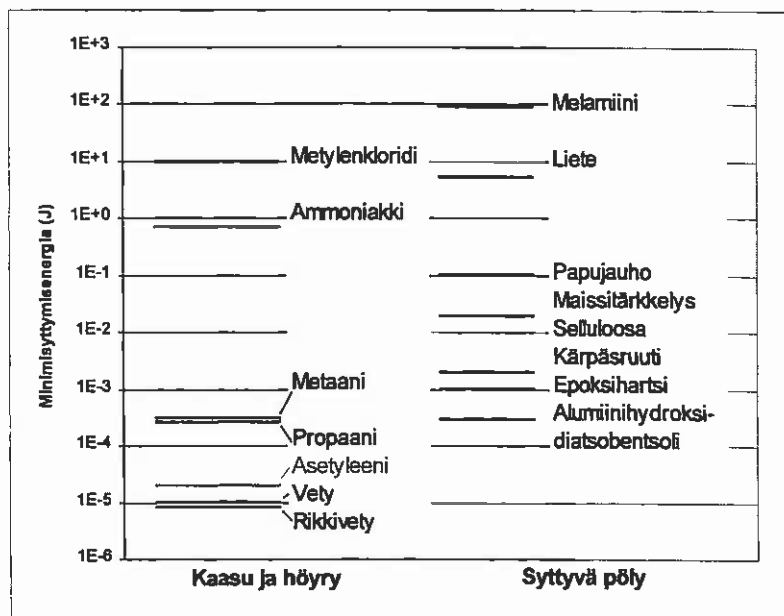
Kuva 1.10. Happipitoisuuden vaikutus fosforipölyn räjähdysominaisuuksiin (Bartknecht 1987).

1.2.4 Pölyn syttyminen

Pölyt voivat syttyä usealla eri tavalla. Kuten kaasutkin, pölyt tarvitsevat paikallisesti korkean energiatihedden syttyäkseen. Pölyn sytyttämisen ulkoisia energialähteitä ovat mekaaniset, iskusta syntyvät kipinät, staattisesta sähköstä tai sähkölaitteesta syntyvät kipinät ja sähköpurkaukset, salama, liekki ja kuumat kaasut, kuumat pinnat ja sähkömagneettinen tai ionisoiva säteily. Pölyn sisäisiä energialähteitä ovat

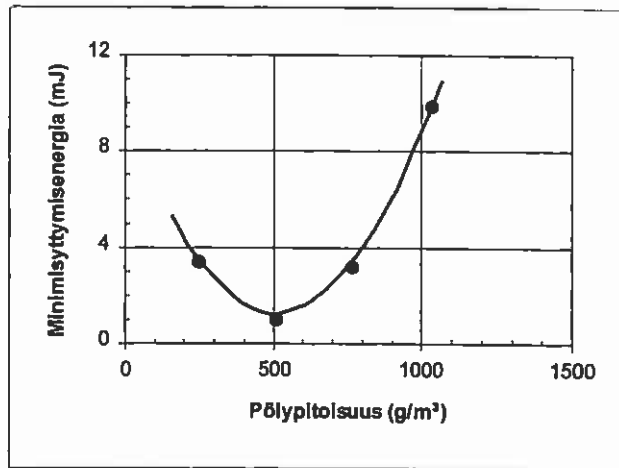
erilaiset kemialliset reaktiot, joista voi vapautua niin paljon energiaa, että pölyn itsesyttymisen on mahdollista.

Keskittyneessä energiapurkauksessa voidaan määritellä minimisyttymisenergia samaan tapaan kuin kaasullekin, pölyn sytyttämiseen vaadittava pienin energiamäärä. Se on hiukan suurempi kuin kaasulle tarvittava energia, kuten selviää kuvasta 1.11. Herkimmät pölyt syttyvät jo 0,2 mJ:n energialla. Minimisyttymisenergia on pölylle tyypillinen suure eikä pölyä voida mitenkään sytyttää tätä pienemmällä energialla. Minimisyttymisenergia saavutetaan tietyllä pölypitoisuudella. Kuvassa 1.12 tämä on mitattu erälle pölylle. Minimisyttymisenergia tarjoaa pölyisessä ympäristössä suojautumiskeinon: siellä toiminnot suunnitellaan siten, ettei mistään pääse syntymään minimisyttymisenergiaa suurempia energiapurkauksia.



Kuva 1.11. Kaasujen ja pölyjen minimisyttymisenergian vertailu muutamille aineille (Bartknecht 1987).

Itsesyttymisessä ei tarvita ulkoista energiaa, jos pöly reagoi hapen kanssa lämpöä tuottavasti. Kun pölyä on riittävä määrä ja se saa olla paikoillaan riittävän pitkään, kemiallinen lämmöntuotto voi muodostua suuremmaksi kuin pölymassasta ympäristöön tapahtuvat lämpöhäviöt. Silloin pöly alkaa hiljalleen lämmetä, mikä kiihdyttää hapettumisreaktioiden nopeutta eksponentiaalisesti. Tämä itseään ruokkiva tila johtaa lämpöräjähdykseen, jossa pölyn lämpötila kohoaa niin korkeaksi, että pöly alkaa kyteä tai palaa avoliekillä. Itsesyttymislämpötiloja ja muita räjähdysominaisuuksia tavallisimmille pölyille annetaan SFS-Käsikirjassa 60 (1984). Laajempia pölyjen ominaisuuksien taulukkoja löytyy oppikirjoista (Eckhoff 1991 ja Field 1982) sekä erikoiskirjallisuudesta. Annettu itsesyttymislämpötila ei ole mikään pölyn ainevakio, vaan viittaa ohuesta pölykerroksesta tietyllä käytännönläheisellä testausmenetelmällä mitattuun arvoon.



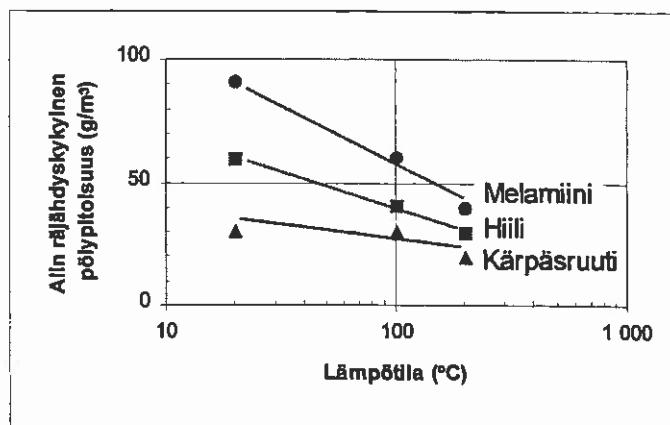
Kuva 1.12. Itsesyttymisenergian riippuvuus pölypitoisuudesta (Eckhoff 1991).

Jos itsesytyvää pölyä kerätään suurempaan säiliöön, sen itsesyttymislämpötila voi olla paljon taulukkoarvoa matalampi. Sääntönä on: mitä suurempi pölymäärä, sitä matalampi itsesyttymislämpötila. Asiaan perehtynyt tutkija voi määrittää pölyn itsesyttymisolosuhteen halutunlaisessa kohteessa mittauksin.

Kaasujen tapaan pölyilläkin on alempi ja ylempi räjähdysraja sekä niiden välillä räjähdysalue. Liitteen taulukossa on annettu alimman räjähdyskykyisen pölypitoisuuden arvoja. Yleensä ne ovat hieman suurempia kuin vastaavat kaasujen pitoisuudet (noin 50 g/m³). Karkea alimman räjähdyskykyisen pölypitoisuuden arvo saadaan laskemalla lukuarvoyhtälöstä (SFS-Käsikirja 60):

$$C_{\min} = \frac{1200}{\Delta H} \text{ g / m}^3 \quad (6)$$

missä ΔH on pölyn tehollinen lämpöarvo yksiköissä MJ/kg. Alemman syttymisrajan arvo pienenee lämpötilan kasvaessa kuten kuvasta 1.13 ilmenee kolmelle esimerkkipölylle (Bartknecht 1987).



Kuva 1.13. Lämpötilan vaikutus alimpaan räjähdyskykyiseen pölypitoisuuteen. Näytteet ylhäältä: melamiini-, hiili- ja katinlieon itiöpöly (kärpäsruti) (Bartknecht 1987).

Pölyjen ylempi syttymisraja on niin suuri, että sitä on vaikea määrittää kokeellisesti. Sillä ei myöskään suojaustoimenpiteenä ole samaa merkitystä kuin kaasujen ylempällä syttymisrajalla. Näitä arvoja ei löydy teknisestä kirjallisuudesta, koska niillä on vain akateemista mielenkiintoa.

1.2.5 Pölyräjähdysten testausmenetelmät

Pölyt luokitellaan erilaisilla standardikokeilla, joista kolme on tällä hetkellä tärkeimpiä. Ne ovat Hartmannin putki, ISO:n 1 m³:n astia ja Siwekin 20 litran pallo.

Hartmannin putken olennaisin osa on pystyssä oleva läpinäkyvä 1,2 litran putki, jonka yläpäässä on kevyt kansi. Putken pohjalla oleva pöly puhalletaan paineilmalla pilveksi ja sytytetään n. 3 J:n sähkökipinällä putken keskivaiheilla olevien elektrodien kohdalta. Räjähdyksen havaitaan silmävaraisesti putken läpi. Laitteisto soveltuu erityisesti minimisyttymisenergian määrittämiseen sekä syttymiseen vaadittavan alimman happipitoisuuden määrittämiseen.

Bartknecht (1987) määrittäi paineennousunopeuksia ja suurinta paineennousua 1 m³:n paineastiassa. Pallomaiseen astiaan puhalletaan painesäiliöstä pöly kaarevan rei'itetetyn putken läpi. Pöly sytytetään 10 kJ:n kemiallisella sytyttimellä pallon keskipisteestä. Paineennousu pallossa mitataan paineanturilla ulkovaipalta. Astiasta on poistoputki palokaasuille, jotka ajetaan astiasta huuhteluilmalla. Astian etuseinä voidaan avata huoltotöitä varten. Laite on hyvin massiivinen eikä sillä kannata tehdä kokeita aivan rutiinitarkoituksiin. Sillä määritetään maksimiräjähdyspaine ja maksimipaineennousunopeus, josta saadaan lasketuksi pölyräjähdysten K_{st}-arvo. Laitteen esikuvan pohjalta kehitettiin myöhemmin ISO:n standardiehdotus ISO/DIS 6184 (1985).

Siwekin pallo on periaatteessa pienennetty 20 litran pallonmuotoinen muunnos ISO:n 1 m³:n astiasta. Mittausperiaatteet ovat samat kuin ISO:n astiassa. Palloa käytetään, koska sillä tehdyt mittaukset ovat huomattavasti yksinkertaisempia ja halvempia kuin ISO:n pallolla tehdyt halvemmän laitteen, pienempien ainemäärien ja erityisesti räjähdysten turvajärjestelyiden vuoksi. Vertailukoesarjoissa on voitu osoittaa, että Siwekin pallolla pölyille saadaan vastaavat K_{st}-arvot kuin ISO:n astialla.

1.2.6 Pölyjen räjähdysvaaraluokittelu

Räjähdyksivaarallisuuden mukaan pölyt luokitellaan K_{st}-arvon mukaisesti neljään luokkaan taulukon 1.1 esittämällä tavalla. Pölyräjähdysvaaran turvallisuustoimet riippuvat pölyvaarallisuusluokasta. Yhtälöstä (4) nähdään, että K_{st} saadaan räjähdystilan koosta riippumatta kertomalla mitattu maksimipaineennousunopeus astian tilavuuden kuutiojuurella.

Taulukko 1.1 Pölyjen räjähdysvaaraluokittelu.

Pölyräjähdysluokka	K_{st} -arvo	Räjähdyksen kuvaus
	bar·m/s	
St0	0	ei räjähdystä
St1	0 ... 200	heikko
St2	200 ... 300	voimakas
St3	> 300	erittäin voimakas

1.3 AINEIDEN LÄMPÖTEKNISIÄ OMINAISUUKSIA

Rakennusaineiden lämpöteknisiä ominaisuuksia on taulukoitu runsaasti erilaisissa käsi- ja taulukkokirjoissa. Tiedot ovat useimmiten mitattu huoneenlämpötilassa (20° C). Palotilanteissa materiaalit esiintyvät korkeissa lämpötiloissa, jolloin niiden ominaisuudet ovat saattaneet muuttua melkoisesti huoneenlämpötilan arvoista. Kirjallisuudessa on erittäin niukasti tietoja rakennusmateriaaleista korkeissa lämpötiloissa. Taulukon 1.2 tiedot (huoneenlämpötilassa) perustuvat Grossin (1985) keräämiin käyrästöihin, jossa on pyritty kattamaan materiaalin koko käyttökelpoinen alue. Mukaan on otettu myöskin vertailukohteeksi vesi ja ilma (Welty ym. 1984), koska näitä esiintyy lähes kaikissa materiaaleissa osana rakennetta. Taulukon 1.2 tiedot on mitattu kuivista tuotteista. Käytännössä useissa näistä materiaaleista voi olla huomattavia määriä kosteutta, joka vaikuttaa merkittävästi niiden lämpöteknisiin ominaisuuksiin. Pienet kosteusmäärät voidaan käsitellä ottamalla niiden vaikutus huomioon materiaalivakioissa ja käsittelemällä lämmönsiirtoa tavalliseen, jähmeille aineille tunnettuun tapaan. Suurempien kosteusmäärien osalta lämmönsiirtoa ja aineensiirtoa on käsiteltävä kytkeytyneenä prosessina. Tätä aihetta ei tässä käsitellä vaan viitataan aineensiirron erikoiskirjallisuuteen. Lyhyt johdanto alan käsitteistöön on esitetty Welty ym. (1984) kirjassa.

Taulukko 1.2. Tavallisimpien rakennusmateriaalien lämpötekniisiä ominaisuuksia.

Materiaali	Tiheys	Lämmön- Johtavuus	Ominaislämpö - kapasiteetti	Lämpötunkeu- tumiskerroin	Lämpötilan- Johtavuus
	ρ	k	c	b	α
	kg/m ³	W/Km	J/kgK	Ws ^{1/2} /Km ²	mm ² /s
Savitiili	1 900	0,72	750	1 013	0,51
Betoni	2 200	1,75	1 000	1 962	0,80
Kipsilevy	790	0,18	900	358	0,25
Kipsilevy	770	0,16	900	333	0,23
Kalsiumsilikaattilevy	740	0,13	1 120	328	0,16
Kaowool	130	0,03	1 050	64	0,22
Puu (mänty, kuusi)	400	0,11	1 210	231	0,23
Puu (lehtikuusi, vaahtera)	510	0,13	1 210	283	0,21
Puu (tammi, koivu)	640	0,15	1 210	341	0,19
Mineraalivilla	130	0,036	900	65	0,31
Pleksilasi	1 180	0,15	1 300	480	0,10
PVC	1 400	0,16	950	461	0,12
Polystyreeni	1 050	0,15	1 160	427	0,12
Solupolystyreeni	34	0,036	1 150	38	0,92
Lasikuitu	50	0,04	800	40	1,00
Huokoinen kuitulevy	240	0,05	1 250	122	0,17
Vermikuliittilaasti	720	0,25	900	402	0,39
Kipsilaasti	1 700	0,8	840	1 069	0,56
Soodalasi	2 500	1,2	750	1 500	0,64
Kova solu-uretaani	24	0,023	1 600	30	0,60
Pehmeä solu-uretaani	50	0,04	1 700	58	0,47
Kovalevy	1 000	0,2	1 250	500	0,16
Nukkamatto	3 000	0,1	1 400	648	0,024
Alumiini	2 700	200	900	22 045	82,30
Teräs	7 850	62	480	15 285	16,45
Vesi	998	0,597	4 182	1 579	0,14
Ilima	1,17	0,02624	1 006	5,56	22,29

Palonsyyt tutkimuksessa ei usein tiedetä, mistä yksittäisistä komponenteista jokin tuote tai ainemäärä koostuu. Lämpötekniisesti tällaisen materiaalin ominaisuudet voidaan arvioida karkeasti käyttäen tietoa, että aineen ominaislämpökapasiteetti c (J/kgK) ja lämpötilanjohtavuus α (m²/s) ovat kaikilla aineilla karkeasti ottaen samoja (tarkemmin kuin yhden kertaluvun sisällä). Lisäksi lämmönjohtavuus k (W/Km) on karkeasti verrannollinen tiheyteen kohtalaisen hyvin lämpöä eristäväillä aineilla, mikä lukuarvokaavana voidaan ilmaista seuraavana sovitteena (Keski-Rahkonen 1992)

$$k \approx 4,2 \cdot 10^{-4} \rho \quad (7)$$

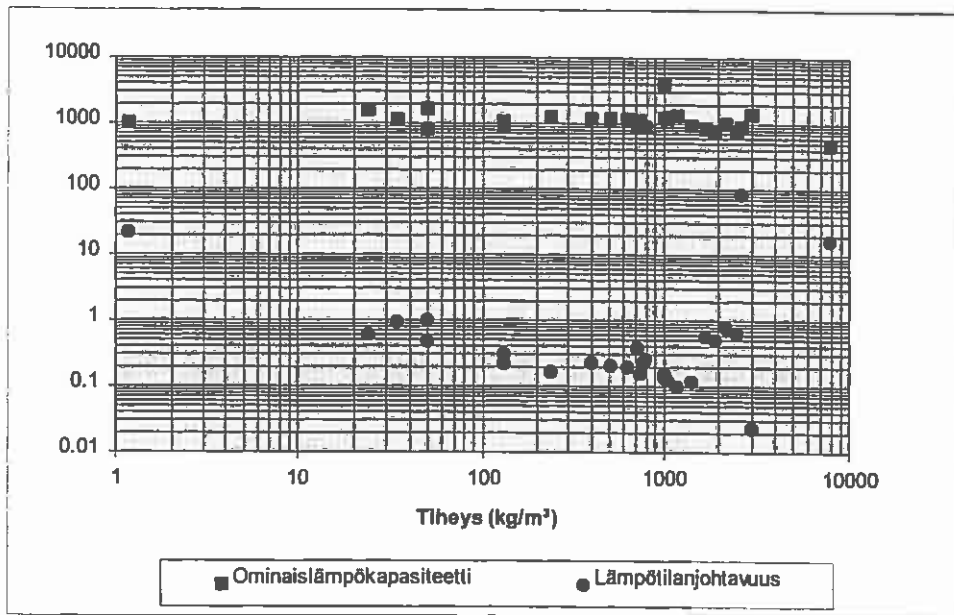
Koska ainevakio ominaislämpökapasiteetti on likipitään vakio, tästä seuraa johdetuille suureille, kuten lämpötilanjohtavuudelle α

$$\alpha = k / \rho c \approx \text{vakio} \quad (8)$$

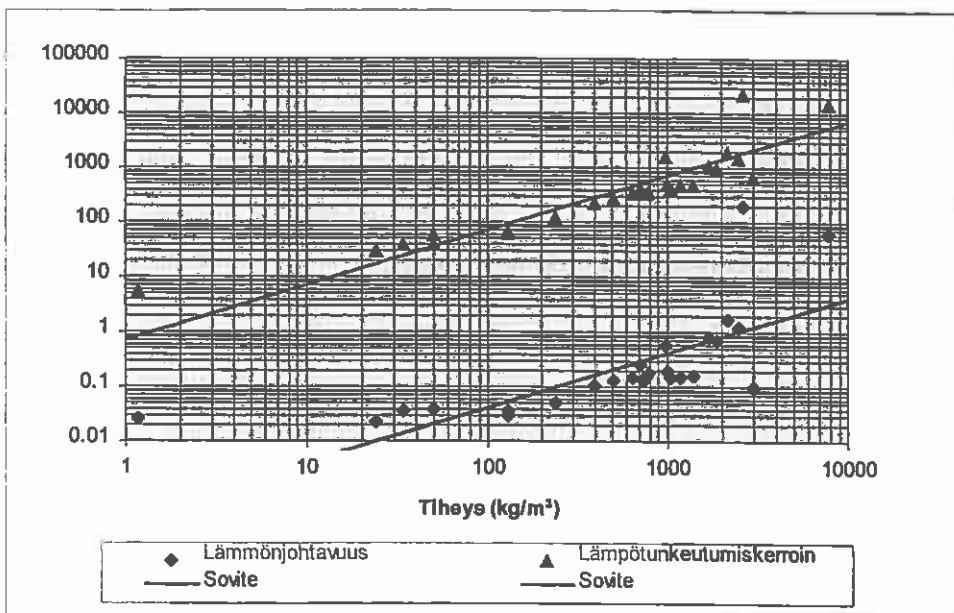
ja lämpötunkeutumiskertoimelle b (Ws^{1/2}/Km²)

$$b = \sqrt{k\rho c} \approx 0,70 \cdot \rho \quad (9)$$

Näiden kaavojen paikkansapitävyydestä saadaan käsitys graafisista esityksistä. Kuvassa 1.14 ja 1.15 on esitetty taulukon 1.2 tietojen pohjalta



Kuva 1.14. Ominaislämpökapasiteetti (J/kgK) ja lämpötilanjohtavuus (mm^2/s) tiheyden funktiona muutamille rakennusaineille. Kumpikaan suure ei riipu järjestelmällisesti tiheydestä, mutta yksittäiset aineet saattavat poiketa melkoisesti keskiarvoisesta käyttäytymisestä.



Kuva 1.15. Lämmönjohtavuuden (W/Km) ja lämpötunkeutumiskertoimen ($Ws^{1/2}/Km^2$) riippuvuus tiheydestä. Kumpikin suure on karkeasti lineaarinen tiheyden funktio, mutta yksittäisten aineiden poikkeamat sovitekäyrältä voivat olla huomattavia.

Taulukossa 1.3 esitetään kahden puulajin ja neljän puutuotteen hiiltymisnopeus eri kosteusarvoilla. Taulukossa 1.4 esitetään metallien ja muutamien muiden aineiden sulamislämpötiloja.

Taulukko 1.3. Kahden puulajin ja neljän puutuotteen hiiltymisnopeus ($\mu\text{m/s}$) eri kosteusarvoilla. Ulkoinen lämpövirrantiheys kokeissa oli 50 kW/m^2 (Mikkola 1990a).

Puulaji/tuote	Kosteus			
	0 %	8 %	10 %	20 %
Mänty	18,5		13,3	
Kuusi	17,7		13,3	10,0
Kertopuu	17,5		13,7	11,3
Koivuvaneri	24,0	19,0		
Lastulevy	18,3	16,2		
Kuitulevy	40,0	30,0		

Taulukko 1.4. Metallien ja muutamien muiden aineiden sulamislämpötiloja.

Materiaali	Sulamislämpötila (°C)
Alumiini ¹⁾	660
Alumiiniseokset	
muokatut seokset ²⁾	480-645
valettavat seokset ²⁾	510-575
Hopea ¹⁾	961
Kulta ¹⁾	1063
Kupari ¹⁾	1083
Lasi ⁴⁾	593-1427
Lyijy ¹⁾	327
Magnesium ¹⁾	649
Messinki	850-1020
muokatut seokset ³⁾	850-1020
valettavat seokset ³⁾	860-927
Muovi (kesto-)	
Akryyli ⁴⁾	90-105
Polyamidi (nailon) ⁴⁾	176-265
Polyeteeni ⁴⁾	122-135
Polystyreeni ⁴⁾	120-160
Polyvinyylidikloridi ⁴⁾	75-105
Nikkeli ¹⁾	1453
Posliini ⁴⁾	1550
Pronssi	
muokatut seokset ³⁾	900-1037
valettavat seokset ³⁾	760-1030
Rauta ¹⁾	1534
Sinkki ¹⁾	420
Tiili, tulenkestävä ⁵⁾	1500-1750
Tina ¹⁾	232
Valurauta	
harmaa ⁴⁾	1350-1400
valkoinen ⁴⁾	1050-1100

¹⁾ Sulonen 1981

²⁾ Hulmi 1981

³⁾ Roitto 1981

⁴⁾ NFPA 921, 1995

⁵⁾ Jotuni 1981

2. LABORATORIOMENETELMÄT

2.1 KAASUKROMATOGRAFIA

Seoksen komponenttien erottelu kromatografialla perustuu aineen jakaantumiseen kahden faasin, liikkuvan ja liikkumattoman faasin kesken. Kaasukromatografiassa liikkuvana faasina on kaasu ja liikkumattomana faasina neste tai jähmeä aine. Jos stationäärifaasina on neste, se on ohuena kalvona huokoisen materiaalin pinnalla. Liikkuvassa faasissa olevat komponentit liukenevat ajoittain nestefaasiin, ja poistuvat takaisin liikkuvaan faasiin dynaamisen tasapainon vallitessa. Menetelmää kutsutaan jakaantumiskromatografiaksi. Jos stationäärifaasi on jähmeä, komponentit kiinnittyvät reversiibelisti kiinteän aineen pintaan. Tätä kutsutaan adsorptiokromatografiaksi.

Kromatografian historia luonnontieteellisenä ilmiönä on pitkä. Strasbourgilainen kirurgi Brunschwig käytti jo vuonna 1512 etyylialkoholin puhdistamiseen oliiviöljyyn kastettua sientä, missä on mukana kaikki nestekromatografian ainekset. Kasvitieteilijä Tswett erotti vuonna 1906 kasvien värejä huokoiseen jähmeään aineeseen. Nämä varhaiset kokeilut eivät kuitenkaan johtaneet spektroskopian kehittymiseen ennenkuin vuonna 1941 Martin ja Synge osoittivat kaasu-nestekromatografian perusteet ja vasta vuonna 1950 James ja Martin tekivät ensimmäiset järjestelmälliset kokeet kaasu-jähmeä aine kromatografialla (Bayer 1961, Ambrose & Ambrose 1961). Nykyaikaista kaasukromatografiaa on käsitelty suomenkielellä (Hästbacka 1980) ja vielä teknisemmällä tasolla Liebmanin & Levyn teoksessa (1985). Tuore katsaus kaasukromatografiasta nykypäivään saakka on Townshendin (1995a) moniosaisessa teoksessa, johon sisältyy myös Neumannin (s. 1899 - 1903) erikoisartikkeli sovelluksista rikosten tutkintaan.

Nykyisin yleisimmin käytetty menetelmä on kapillaarikolonnikaasukromatografia, jossa ohuen kapillaarikolonniputken sisäpintaan on kiinnittynyt nestekerros ja erottuminen perustuu jakaantumiseen.

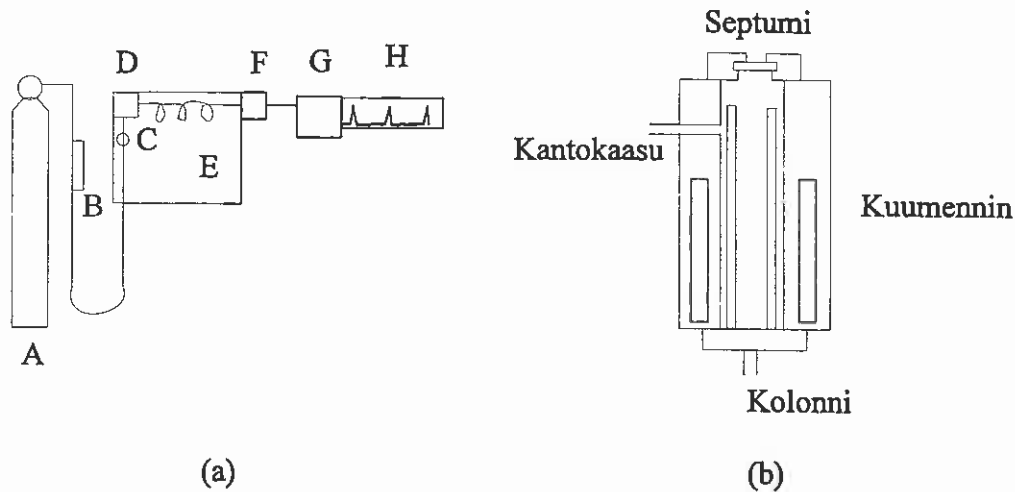
Jakaantuminen faasien välillä tapahtuu kullekin yhdisteelle luonteenomaisen jakaantumiskertoimen K perusteella

$$K = \frac{C_s}{C_M} = \frac{n_s}{n_M} \frac{V_M}{V_s} = k' \beta \quad (10)$$

missä C_s on yhdisteen pitoisuus liikkumattomassa ja C_M kaasufaasissa, n_s yhdisteen ainemäärä liikkumattomassa ja n_M kaasufaasissa sekä k' kapasiteettitekijä ja β faasisuhde.

Mitä suurempi on aineen liukoisuus stationäärifaasiin, sitä suurempi on K . Aineiden erottuminen toisistaan riippuu niiden jakaantumiskertoimista, joiden tulee olla erilaiset. Lämpötilan nosto pienentää K :n arvoa ja lyhentää näin ollen aineen eluointiaikaa kolonnissa eli samalla koko analysointiaikaa.

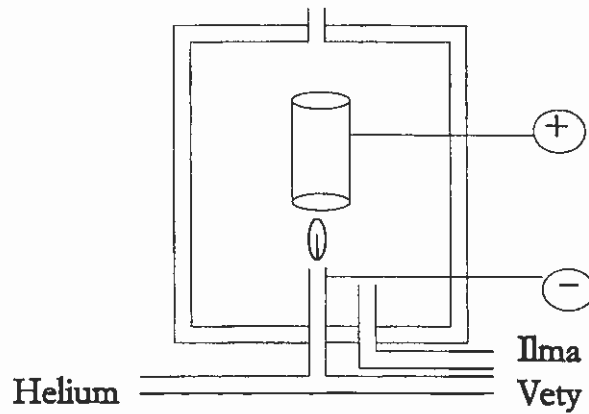
Kaasukromatografialaitteisto on esitelty kuvassa 2.1. Kaasupullosta (A) tuleva kantajakaasu johdetaan kaasunkuivausputken (B) läpi alentaen painetta sopivalle tasolle alennusventtiilillä ja sääten neulaventtiilillä virtausnopeus sopivaksi injektoriin. Kaasun lämpötila tulee säätää niin korkeaksi, että septumin läpi ruiskutettu näyte pysyy kaasuna (kaasunäyte) tai kaasuuntuu (nestenäyte) ja kulkeutuu kantajakaasun avulla kolonniin. Kolonni on sijoitettu uuniin, jonka lämpötilaa voidaan muuttaa.



Kuva 2.1. Kaasukromatografi (a) sekä injektori (b). A kaasusäiliö ja paineenalennusventtiili, B kaasunkuivausputki, C neulaventtiili, D injektiopestä, E uuni ja kolonni, F detektori, H kromatogrammi.

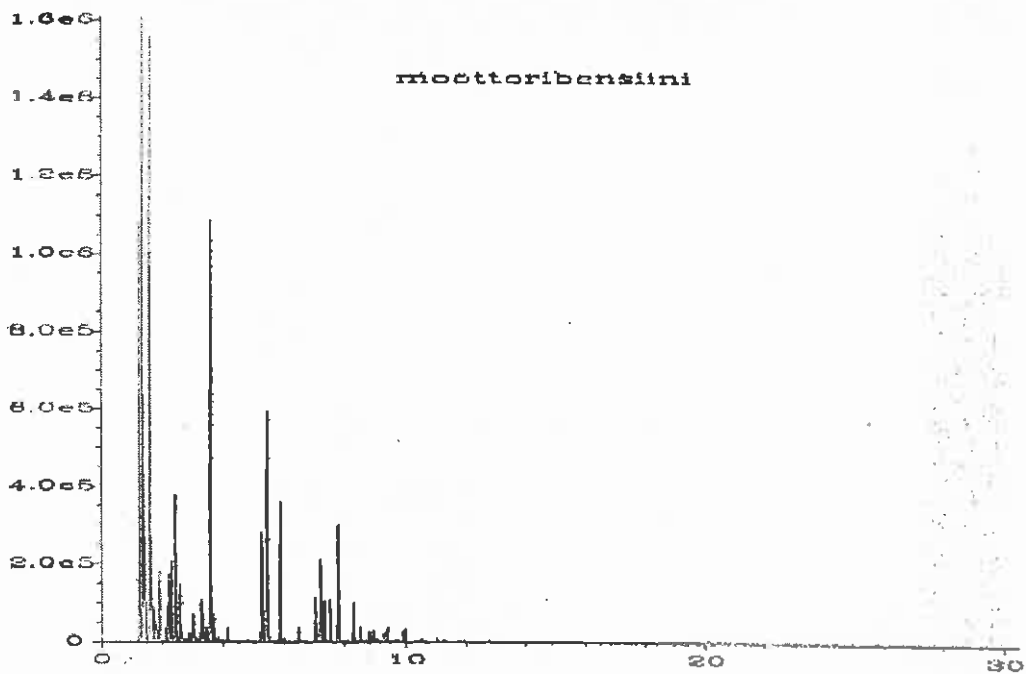
Mikäli tutkittavan näytteen komponentit ovat erottuneet hyvin kolonnissa, ne saapuvat yksitellen ilmaisimeen. Sen lämpötilan tulee olla riittävän korkea, jotta aineet eivät tiivistyisi siinä.

Yleisimmin käytetty ilmaisimien on liekki-ionisaatiotektori (FID; Flame Ionization Detector), kuva 2.2. Kantajakaasun mukana tulevat orgaaniset molekyylit palavat vetyliekissä ja ylimäärässä happea. Tällöin syntyy elektroneja ja sähköisesti varautuneita hajoamistuotteita. Syntyneet ionit kerätään sähkökentällä kollektorielektrodille ja syntynyt sähkövirta mitataan. Tällöin saadaan kuvaajaksi kromatogrammi, jossa x-akseli kuvaa yhdisteiden viipymää kaasukromatografissa eli retentioaikaa ja y-akseli yhdisteiden suhteellista pitoisuutta näytteessä. Kuvissa 2.3 ja 2.4 on esitetty moottoribensiinin ja kaasuöljyn kromatogrammit, jotka ovat tavallisimmat löydökset palojätteenäytteistä.

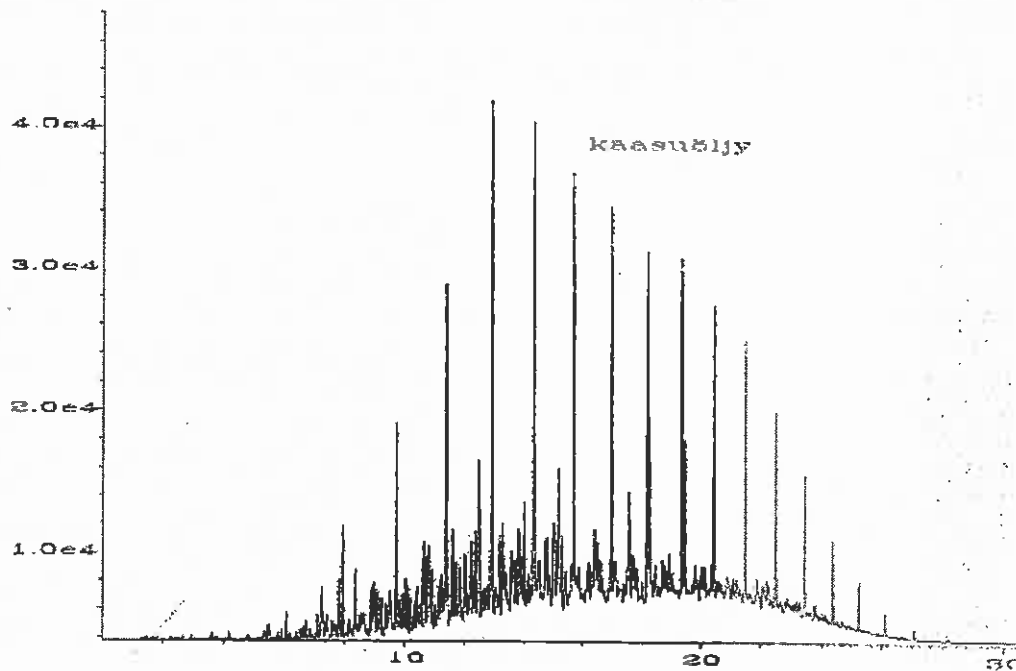


Kuva 2.2. Kaasukromatografian liekki-ionisaatioilmaisin.

Rikosteknisessä laboratoriossa palavien nesteiden toteamiseen käytettävän menetelmän laitteisto on seuraava: kaasukromatografi, johon on liitetty mikrotietokone, kolonnina on silikakapillaarikolonne 25 m x 0,32 mm sisälämpimitaltaan 0,25 μm , kantajakaasuna on helium (He), injektorin lämpötila on 225 °C ja ilmaisimen lämpötila 280 °C. Ajo-ohjelma lähtee 35 °C:sta, jossa se on aluksi 2 min. Lämpötila nousee 10 K/min aina 270 °C:een ja pysyy siinä 5 min ajan.



Kuva 2.3. Moottoribensiinin kaasukromatogrammi.



Kuva 2.4. Kaasuöljyn kaasukromatogrammi.

2.2 MASSASPEKTROMETRIA

Klassisen magneettikenttää käyttävän massaspektrometrin kehitti Englannissa Aston vuonna 1919 ja hänestä riippumatta Yhdysvalloissa Dempster 1918. Kemian analyttiseksi työkaluksi massaspektrometri kehitettiin 30-luvulla, mutta laitteet olivat suuria ja kalliita. Kvadrupolimassaspektrometri käyttää massanerottelijana magneettikentän sijasta sähkökenttää. Kvadrupolimassaspektrometrit kehitettiin ensin hiukkaskiihdyttimien elektroniopisiksi komponenteiksi, mutta otettiin pian käyttöön myös analyttisenä työkaluna ensin tyhjötekniikan jäännöskaasuanalysointoreina. Mikroelektronikan kehittymisen myötä kvadrupolimassaspektrometrin erotuskyky saatiin niin suureksi, että sitä voidaan käyttää hyvin moniin analyttisiin sovelluksiin pienehköillä massaluvuilla. Massaspektrometreja ja kvadrupolimassaspektrometreja käsitellään Townshendin (1995b) tietosanakirjassa, johon sisältyy myös Liun (s. 2989 - 2996) erikoisartikkeli sovelluksista rikosten tutkimuksessa.

Massaspektrometriassa näyte tai näytteestä erotellut komponentit johdetaan ionisaatiokammioon, jossa ne esim. elektronipommituksella ionisoidaan (positiivinen varaus). Massanerottelijana kvadrupolimassaspektrometrissä on sähkökenttä, jonka läpi tietyn massa/varaussuhteen (m/e) omaavat ionit pääsevät ilmaisimeen. Massaspektrometrillä voidaan siis määrittää ionin massan ja varauksen suhde. Jos ionin varaus tunnetaan, ionin massa voidaan määrittää. Massanerottelija toimii siten kaistanpäästösuodattimena. Kaistan arvoa voidaan muuttaa nopeasti sähköisesti. Pyyhkäisemällä halutun mittausalueen yli ja

rekisteröimällä ilmaisimeen tulleiden ionien määrä samassa tahdissa voidaan muodostaa massaspektri.

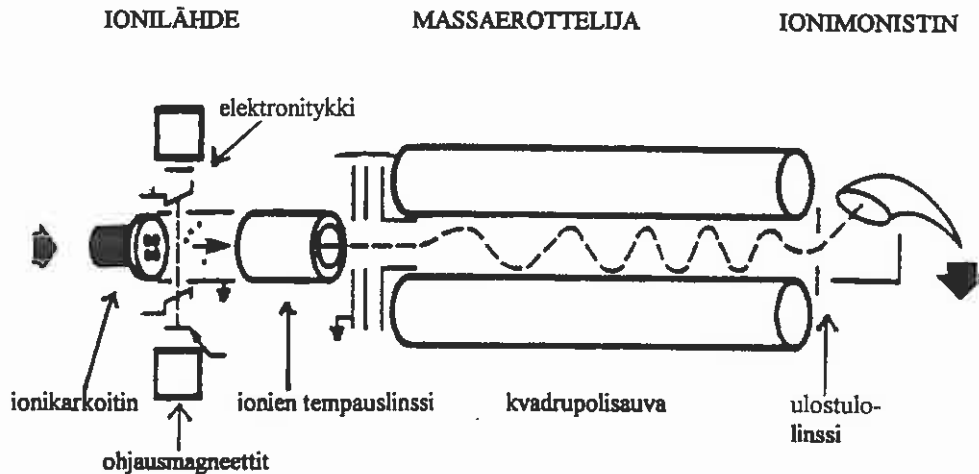
Näytteen syöttötapoja massaspektrometriin on useita. Yleisimmin käytetty menetelmä on kaasukromatografia-massaspektrometri, jossa näytteen komponenttien erottelu tapahtuu kaasukromatografilla edellä esitetyllä tavalla. Ilmaisimen sijasta tutkittavat yhdisteet ohjautuvat massaspektrometriin interfaasin kautta ionisaatiokammioon.

Palavien nesteiden analytiikassa käytettävässä laitteistossa kaasukromatografissa erotellut molekyylit ionisoidaan elektronipommituksella (kuva 2.5). Tällöin neutraaleja molekyylejä pommitetaan sähkökentässä kiihdytetyillä, suuren nopeuden saaneilla elektroneilla. Elektronivirta saadaan aikaan kuumentamalla sähköisesti reniumlangasta tehtyä hehkulankaa, joka on negatiivisessa potentiaalissa lähialueen elektrodeihin nähden. Elektronit suuntautuvat hehkulankaa vastapäätä olevalle kollektorille (anodille), joka on hehkulankaan nähden positiivisessa potentiaalissa.

Pommituksessa ylimääräistä energiaa omaavat ionit pilkkoutuvat vielä sirpaleiksi. Pilkkoutuminen tapahtuu sitä helpommin mitä heikompia molekyyliden sidokset ovat. Ionisoitumisen tehostamiseksi on ionilähteen molemmilla puolilla magneetit. Syntyneet positiiviset ionit ohjataan positiivisen elektrodin ionikarkoittimen ja negatiivisen kiihdytyslevyn sekä fokusointilinsien (ionien tempauslinssi) avulla kvadrupolialiansaattoriin.

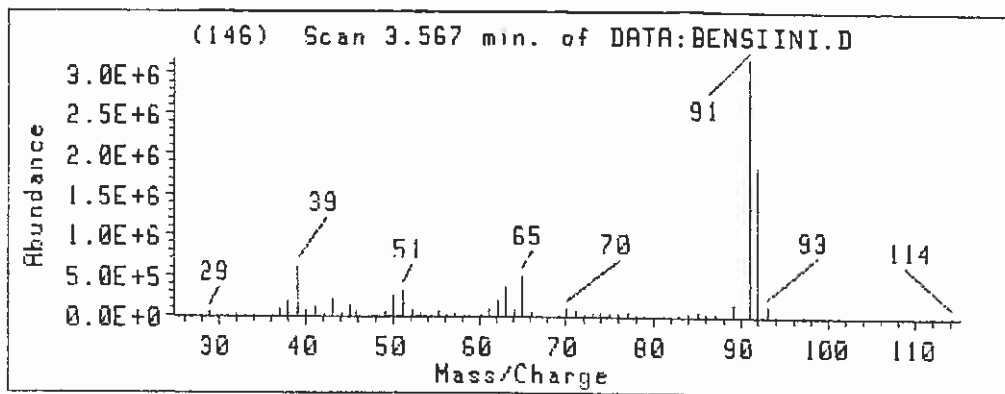
Analysaattori sisältää neljä yhdensuuntaista sylinteritankoa. Vastakkaiset tangot on kytketty toisiinsa ja muodostavat näin samassa potentiaalissa olevan parin. Elektrodit muodostavat niiden ympärille kvadrupolisymmetrisen sähkökentän, josta spektrometrin nimi juontuu. Tankojen väliin kytketään sekä tasavirta- että vaihtovirtasähköpotentiaali. Vaihtojännitteen taajuus on vakio, ja sen tehtävä on parantaa ilmaisimen signaali-kohinasuhdetta. Tasajännitettä pyyhkäisemällä valitaan sähköstaattiselle kentälle arvo, jolla vain tietyn m/e suhteen omaavat ionit pääsevät ilmaisimeen.

Ilmaisimena toimii yleensä suppilon muotoinen elektronimonistin, jonka pinnasta sähköisesti varautuneet hiukkaset kykenevät irrottamaan elektroneja. Ionien iskun aiheuttama sähkövirta vahvistetaan ja viedään analogi-digitaalimuuntimelle, joka muuntaa sähkövirran voimakkuuden digitaaliseen (numero)muotoon. Työasematietokoneelle tallentuvat signaalin voimakkuus atomimassayksikköä (amu) kohden. Tietokoneella voidaan tulostaa massakromatogrammeja eli muodostuneiden ionien kokonaismäärää ajan funktiona, tai tietyllä ajanhetkellä ionisoituvan yhdisteen massaspektri.



IONILÄHTEEN PAINE $10^{-4} - 10^{-6}$ TORR
 ELEKTRONIPOMMITUSVIRTA 300mA
 ELEKTRONIPOTENTTIAALI 70eV
 IONISOITUMISTEHOKKUUS NÄYTEMOLEKYYLEILLE ~0,01 %

Kuva 2.5. Kvadrupolimassaspektrometrilaitteisto.



Kuva 2.6. Moottoribensiinissä olevan tolueenin massaspekttri. X-akseli kuvaa ionien massalukua (amu) ja y-akseli intensiteettiä.

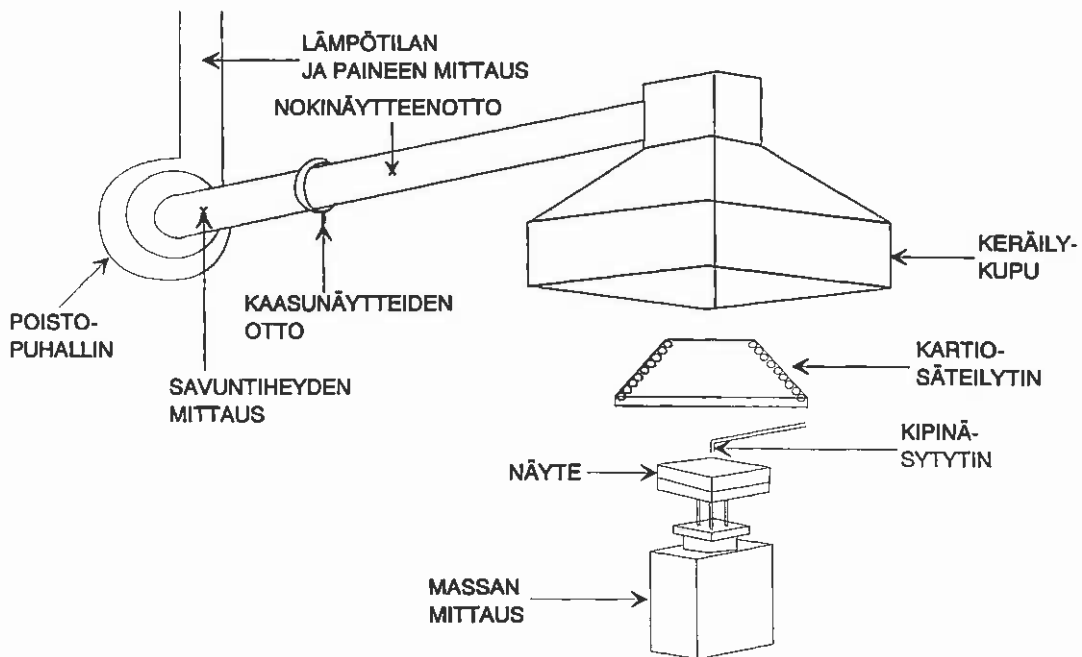
2.3 KARTIOKALORIMETRI

Kartiokalorimetri on uuden sukupolven laite palotestien alueella (Mikkola 1990b). Sen mittausmenetelmillä on vankka tieteellinen pohja ja sillä saadaan mitattua samanaikaisesti materiaalin tai tuotteen oleelliset palotekniset ominaisuudet. Mittaustuloksina saatavat syttymisaika, lämmönvapautumisnopeus, massan-

muutosnopeus, palamislämpö, savun ja noen tuotto sekä tarvittaessa savukaasujen koostumus ja pitoisuudet antavat varsin monipuolisen kuvan tuotteen palominaisuuksista.

Kartiokalorimetrin yksinkertaistettu rakenne on seuraava (kuva 2.7): vaaka, jolle näyte asetetaan, kartion muotoinen säteilytin ja palamistuotteiden keräilyjärjestelmä, johon on sijoitettu kaasu- ja nokinäytteenotot sekä poisto- kaasujen ja virtausnopeuden mittaukset.

Kartiokalorimetrissa tarvitaan vain pieniä näytepaloja, näytteen koko on $100 \times 100 \text{ mm}^2$, paksuus enintään noin 50 mm. Näytteen palamista voidaan tutkia sekä vaak- että pystytasossa. Näytteeseen kohdistuva lämpösäteilyn intensiteetti on kokeen aikana vakio ja se voi vaihdella välillä $0 \dots 100 \text{ kW/m}^2$.



Kuva 2.7. Kartiokalorimetrin rakennekaavio Mikkolan (1990b) mukaan.

3. SÄHKÖJOHTOJEN JA -KYTKIMIEN VAURIOIDEN TUTKIMISEN KIRJALLISUUSKATSAUS

3.1 KUPARIN METALLIOPPI TAUSTATIETONA

3.1.1 Mikrorakenne

Kohdassa 3.1 esitellään Levinsonin (1977) artikkelia. Hän on tarkastellut kuparisten sähköjohtojen rakennetta ja tunnusomaisia piirteitä metallurgiselta näkökannalta. Levinsonin tarkastelu koskee havaintoja joita voidaan tehdä metallimikroskoopeilla, joiden suurennus on 50 - 2000-kertainen. Tavanomainen suurennos on 100-kertainen. Näytteen pinta hiotaan tasaiseksi, kiillotetaan ja syövytetään lievästi kemiallisesti rakenteen tutkimista varten.

Vaurioitumaton kuparijohdin koostuu monesta toisiinsa sidotuista kiteistä eli rakeista, se on monirakeinen. Kuparimetallien rakennetta on käsitelty seikka-peräisemmin Miekk-ojan (1965) teoksessa. Rakeet ovat valmistusvaiheen vetoprosessissa venyneet johtimen pituussuunnassa. Johtimen poikkileikkauksessa venytyksen vaikutusta ei näy, koska rakeiden akselit ovat samansuuntaiset. Rakenne koostuu ainoastaan kuparirakeista, mikä osoittaa että kupari on hyvin puhdasta. Happi kuparissa muodostaa kuparioksiduulia Cu_2O , mikä näkyy harmaana faasina kaikkialla rakenteessa. Kuparia lämmitettäessä mikrorakenne yleensä muuttuu.

3.1.2 Sulaminen ja jäähtyminen

Kun kupari sulaa, ympäristössä oleva happi alkaa välittömästi liueta kupariin. Liuenneen hapen määrä riippuu hapen saatavuudesta, kuparin lämpötilasta ja kuparin sulan vaiheen kestosta. Jos joku näistä tekijöistä kasvaa, hapen liukeneminen kupariin lisääntyy. Vastaavasti, hapen määrän, lämpötilan tai käytettävissä olevan ajan pienentäminen vähentää hapen kulkeutumista kupariin. Jos kupari ei ole edes paikallisesti sulanut, happea ei kulkeudu kupariin ja hapettuminen rajoittuu ohueen kerrokseen kuparin pinnalla. Toisaalta, jos lyhytaikainenkin sulaminen tapahtuu ilmassa, hapen kulkeutumista kupariin tapahtuu. On käytännössä mahdotonta, että sulaminen ja jäähtyminen tapahtuisi niin nopeasti että hapen kulkeutumista kupariin ei olisi havaittavissa.

Jäähtyminen tapahtuu siten että ensiksi muodostuvat suhteellisen isoja rakeita puhtaasta kuparista ja raerajoille muodostuu pienempien kupari- ja kuparioksiduulirakeiden seos. Tämän lisäksi metalliin syntyy vähän huokoisia, jotka ovat kuparioksiduulin peittäminä. Jos puhdas kupari on sulanut ilmassa, eikä kupariin kulkeutunutta happea ole kemiallisesti poistettu ennen jäähmettymistä, happi näkyy mikrorakenteessa. Rakenne ei riipu kuparin lämmittämistavasta. Oleelliset muuttujat ovat lämpötila, aika ja happipitoisuus. Pinnan ulkonäkö on tunnusomainen hapekkaassa ympäristössä sulaneelle kuparille.

Jotkut epäpuhtaudet voivat vähentää hapen kulkeutumista kupariin. Sellaisia ovat tina tai juote kuparin pinnalla, josta sulaessa tina tai mahdollisesti lyijy sekoittuvat kupariin.

3.1.3 Uudelleenlämmittäminen jähmettymisen jälkeen

Jos kuparia lämmitetään uudelleen jähmettymisen jälkeen tai kupari jää kuumaksi pitkäksi ajaksi sulamisen ja jähmettymisen jälkeen, sen mikrorakenne muuttuu. Edellä mainittu kupari-kuparioksiduuliseos muuttuu karkeammaksi eikä enää muistuta aikaisempaa seosta. Oksidirakeet sulautuvat yhteen, mutta pysyvät niissä kohdissa, joissa aikaisempi kupari-kuparioksiduuliseos oli. Rakenne ei enää muistuta sulasta jähmettyneen kuparin rakennetta ja voidaan siksi tulkitakin väärin. Rakenne on kuitenkin tyypillinen kuparisulatteelle, johon on kulkeutunut happea ja joka on pysynyt kuumana jonkin aikaa jähmettymisenkin jälkeen.

3.1.4 Oksidin poistuminen

Puhtaan johtokuparin valmistuksessa sulatteen pinta peitetään hiilellä tai koksilla, ja happi poistetaan sulasta hiiltä tai hiilivetyjä sisältävillä kaasuilla. Hiilipitoiset aineet, jotka koskettavat kupariin, voivat tulipalossa vähentää samalla tavalla kemiallisesti oksidipitoisuutta kuparisulassa. Silloin kupariin jää aina huokosia ja vähän tai ei ollenkaan kupari-kuparioksidiseosta. Nämä huokokset erottuvat jähmettymisprosessin aikana syntyneistä huokosista siten, että niiden sisäpinnat ovat aivan puhtaat ja niiden lukumäärä on suurempi. Levinson vertaa metallia reikäjuustoon. Rakenne voi syntyä hyvin nopeasti eikä riipu siitä, onko kupari sulanut palon, sen oman sähkövastuksen tai valokaaren vaikutuksesta. Levinsonin mukaan tällainen rakenne esiintyy usein tai lähes aina tulipaloissa, missä on ollut eristettyjä kuparijohtoja.

3.1.5 Pohdiskelua

Jos paljas kuparijohdin sulaa ja jähmettyy uudestaan, siihen syntyy normaali jähmettymisrakenne. Jos eristys on hävinnyt ennen kuparin sulamista, se viittaa siihen, mutta ei vielä todista, että palo on aiheuttanut sähköhäiriön ja/tai kuparin sulamisen eikä päinvastoin. Levinsonin näkemys on, että virtapiirin ollessa asianmukaisesti suojattu sulakkeilla tai vastaavilla, oikosulun tai ylikuumentumisen aiheuttama ympäristön syttyminen on harvinaista. Metallurgiset vauriot kuparisähköjohdoissa ovat siten useimmiten tulipalon seuraus eikä tulipalon syy.

3.1.6 Uudelleenkiteytyminen

Toinen mikrorakenteen muutos, uudelleenkiteytyminen, tapahtuu kuparia lämmitettäessä yli 260 °C:n lämpötilaan. Muutokseen tarvittava aika lyhenee nopeasti nousevan lämpötilan mukana, uudelleenkiteytymiseen tarvittava aika lämpötilassa 260 °C on noin tunti, mutta lämpötilassa 538 °C ja sitä korkeammassa aika on pudonnut muutamaan sekuntiin. Tällaisessa hehkutuksessa johdin pehmenee huomattavasti.

Kun johdin kiteytyy uudelleen, langanvedossa syntyneet pitkittäiset venytetyt rakeet häviävät ja tilalle ilmestyy uusia, usein sivuiltaan yhdensuuntaisia rakeita. Rakeiden koko riippuu monimutkaisella tavalla lämpötilasta, hehkutusajasta sekä alkuperäisestä muokkausasteesta. Hehkutetun johtimen rakeiden koosta yksistään ei pystytä sanomaan juuri mitään muuta lämpötilasta tai hehkutuksen kestosta kuin, että johdin on ollut yli 260 °C:n lämpötilassa.

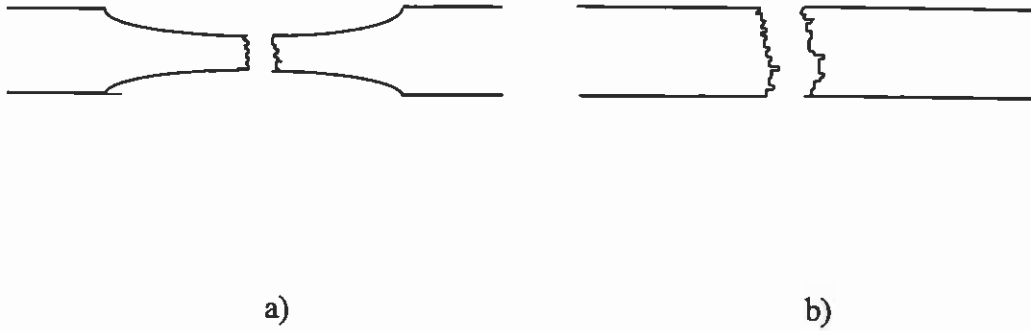
Jos johdin on tasaisesti uudelleenkiteytynyt koko pituudeltaan, sitä on joko hehkutettu valmistusvaiheessa, lämmitetty sähköisesti tai se on lämmennyt erittäin tasaisesti tulipalossa. Ensimmäinen ja viimeinen mahdollisuus ovat epätodennäköisiä. Jos palojäännöksistä löytyy johtimia, jotka ovat tasaisesti uudelleenkiteytyneet koko pituudeltaan, se viittaa johtimien kuumentumiseen sähköisesti ja olemiseen yli 260 °C:n lämpötilassa niin kauan, että mikrorakenne on ehtinyt syntyä. Näin ollen johtojen lämpeneminen on saattanut sytyttää palon. Tällaiset jäljet eivät kuitenkaan anna täysin varmaa näyttöä asiasta.

Osa johtimesta voi tulipalossa kuumentua lisää ja saada muita mikrorakenteen muutoksia, jotka peittävät tasaisen uudelleenkiteytymisen vaikutuksen. Tämä vaikeuttaa tietysti analyysia.

Jos johtimen osassa ei ole uudelleenkiteytymisen merkkejä, niin se ei ole ollut sellaisessa aika/lämpötilarasituksessa, joka on uudelleenkiteytymisen edellytys. Silloin on todennäköistä, että muualla johtimessa ollut uudelleenkiteytyminen on ollut tulipalon seuraus eikä tulipalon syy. Jos löytyy johtimen osia, jotka selvästi ovat olleet kokonaan suojattuna tulipalon lämmöstä, niin uudelleenkiteytyminen koko suojatun osan pituudelta on varsin selvä osoitus johtimen sähköisestä kuumentumisesta, erityisesti johtimen eristeen palettua tai hiillyttyä.

3.1.7 Silmämääräiset havainnot makrorakenteesta

Jos johdinta venytetään katkeamiseen asti, siihen tulee tyypilliset vedon aiheuttamat suippeumat murtuman lähelle (kuva 3.1 a). Tällainen jälki syntyy sekä virralliseen että virrattomaan johtoon.



Kuva 3.1. Kaavamainen kuva kuparijohtimesta, jossa on a) venytyksen aiheuttamat suippeumat murtumakohdan lähellä ja b) yli 1065 °C:n lämpötilassa syntynyt haurasmurtuma.

Kun johdin saavuttaa lämpötilan 1065 °C, paikallista sulamista esiintyy raerajoilla ja johdin murtuu hauraasti, so. ilman olennaista pysyvää (plastista) muodonmuutosta. Murtumakohta näkyy suorakulmaisena ilman suppeumaa (kuva 3.1 b). Molemmissa tapauksissa, jos johtimessa kulkee sähkövirta, niin usein esiintyy valokaari joka sulattaa johtimen murtumakohdan päät pisaranmuotoisiksi. Koska tulipalo voi myös sulattaa johdinta ja saada aikaan pisaranmuotoisia johdinpäitä, pisaroiden esiintyminen ei välttämättä osoita, että johdin oli virrallinen ja murtumishetkellä esiintyi valokaari. Toisaalta pisaroiden puuttuminen osoittaa, että murtumishetkellä johdinta ei kuormitettu tavanomaisella virralla. Sen sijaan pisaroiden puuttuminen ei osoita, että johto ei ollut virrallinen tai ettei siinä ollut pieniä sähkövirtoja, jotka eivät kyenneet aiheuttamaan näkyvää sulamista. Levinson painottaa että johtopäätöksiä tulipalon syystä ja seurauksesta on tehtävä hyvin huolellisesti. Pisaroiden esiintyminen on tarkkaan ottaen vain osoitus siitä että kupari on sulanut, mikä Levinsonin mukaan voi esiintyä useinkin myös pienissä tulipaloissa, joissa palaa tavanomaisia aineita. Siten pisaroiden esiintyminen ei ole todistus valokaaresta, vaikka valokaari yleensä tuottaa pisaroita.

Pisaroita saattaa irrota johtimista ja löytyä irrallisina palojäännöksistä.

Levinson toteaa, että koska pisaroiden mikrorakenne riippuu lämpötilasta, sulan vaiheen kestosta, hapen pitoisuudesta, pelkistävien aineiden läsnäolosta ja jäähtymisnopeudesta, ei ole olemassa yksinkertaista menetelmää erottaa, mikä eri prosesseista on ensiksi aiheuttanut sulamisen.

Lisäksi ei ole mahdollista määrittää, milloin sulaminen tapahtui. Valokaari on saattanut esiintyä huomaamatta kuukausia ennen paloa, ja asia huomataan vasta palon jälkeen palojäännöksiä tutkittaessa.

Levinson päättää artikkelinsa toteamalla, että mikrorakenteiden muutoksien analysointi on tehtävä hyvin huolellisesti ja että se on hyvä jättää kuparin metalliopin asiantuntijan tehtäväksi.

3.2 YLEISTÄ POHDINTAA SÄHKÖPALOISTA

Belandin yleiset mielipiteet

Beland on 1980-luvun alkupuoliskolla aktiivisesti julkaissut tietoa ja ottanut kantaa sähköisistä palonsyistä. Hän on Fire Technology-artikkelisarjan (Beland 1980, 1981, 1982a, 1982b, Beland, Roy ja Tremblay 1983 sekä Beland ja Saucier 1986) lisäksi kirjoittanut kaksi artikkelia Journal of Forensic Science lehteen (Beland 1984a, 1984b), jossa esitetään yleisesti sähköisten palonsyiden ongelmallisuus tutkimuksissa ja kuinka moni palonsyy on väärin perustein luokiteltu sähköiseksi. Erityisesti tuodaan esille valokaarijälkien väärä tulkinta palonsyyksi tilanteissa, joissa valokaari on ollut tulipalon aiheuttama. Annetaan esimerkkejä siitä, missä palonsyyn arvailut ovat olleet pahasti virheellisiä. Kuparin ja alumiinin seoksen alhainen sulamispiste on ollut huonosti tiedetty asia palonsyytutkijoiden joukossa. Jos sula alumiini putoaa kuparijohtimen päälle, se seostuu siihen, minkä jälkeen seos sulaa. Beland antaa esimerkkejä kuvineen tästä (1984b). Tämä asia käsitellään erikseen kohdassa 3.3. Belandin artikkelit käsittelevät lähinnä kotitalouksissa esiintyviä sähköasennuksia.

Beland tuo myös esille rakentamis- ja sähkömääräysten väärinkäytön palonsyyn tutkimuksessa. Tapauksissa, joissa on löytynyt määräysten vastaisia ratkaisuja, on tehty suora johtopäätös ilman syvempää analyysia, että on aiheutunut vaaratilanne. Määräyksissä on yleensä turvallisuuskertoimia ja on muitakin näkökulmia kuin paloturvallisuus. Kaikki määräysten vastaiset ratkaisut eivät *välttämättä* aiheuta *palovaaraa*. Mahdollisen vaaratilanteen arvioimiseksi on tehtävä joko laskennallinen arvio tai tarkkoja rekonstruktiokeiteita jotka mahdollisimman tarkasti vastaavat todellista tilannetta. Vasta tilanteen tarkempi analyysi antaa tietoa siitä, miten tehty havainto liittyy tulipalon syntyyn ja kehitykseen.

3.3 ALUMIININ JA KUPARIN VUOROVAIKUTUKSEN AIHEUTTAMAT JÄLJET

Kun kaksi seostuvaa metallia sulatetaan, ne saattavat liueta toisiinsa seoksina, joiden sulamislämpötila on matalampi kuin toisen tai kummankin puhtaan komponentin sulamislämpötila. 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, joskin seoksen muodostumisnopeus hidastuu huomattavasti, jos reaktio tapahtuu jähmeässä muodossa. Niin kauan kuin metallien pinnat ovat kontaktissa, ne sekoittuvat toisiinsa nopeudella, joka riippuu lämpötilasta. Jos sula alumiini on kosketuksissa esimerkiksi kuparijohtimen kanssa, sekoittuminen tapahtuu nopeasti, erityisesti johtimen ollessa kuuma, ja syntynyt seos sulaa nopeasti.

Hyvin määritellyissä olosuhteissa voidaan ennustaa metalliseosten muodostumisen reaktiot tarkasti. Tulipalossa olosuhteet muuttuvat nopeasti ja reaktioihin vaikuttavat tekijät kuten lämpötila, kaasumainen ympäristö ja

metallien välinen kontakti ovat yleensä vaikeasti määriteltävissä. Metallien välinen vuorovaikutus tulipalossa on siten vaikeasti ennustettavissa, mutta ilmiöiden tunteminen yleisellä tasolla on hyvä pitää mielessä.

Beland ym. (1983) ja Beland ja Saucier (1986) ovat tutkineet kuparijohtimien ja alumiinin vuorovaikutusta. Laboratoriokokeissa upotettiin kuparijohtimia 780 °C-asteiseen alumiinisulaan sekä lämmitettiin alumiinikotelolla suojattuja kuparikaapeleita uunissa 800 °C:n lämpötilassa. Kuparijohtimet olivat virrattomia kaikissa kokeissa. Molemmista koesarjoissa havaittiin kuparin kuoppautumista. Vauriot olivat joko paikallisia tai laajemmille alueille levinneitä, joissakin tapauksissa johtimet olivat kokonaan poikki. Johtimen pinta saattoi vaurioitua jostakin kohdasta ja viereinen pinta säilyä koskemattomana. Vaurion laajuus näytti riippuvan kuparipintaa suojaavasta oksidikerroksesta. Samantyyppinen alumiinikotelolla suojattu kuparijohdin vaurioitui vastaavalla tavalla puupalossa. Kokeet osoittivat selvästi, että kuparijohdin liukeni satoja asteita puhtaan kuparin sulamislämpötilan alapuolella. Kuparijohtimien pinnassa oli alumiinin väri havaittavissa missä sekoittumista oli tapahtunut.

Todellisesta tulipalosta löytyneissä kuparijohtimissa oli samankaltaisia vaurioita. Palaneessa rakennuksessa oli ollut useammassa paikassa alumiiniosia kuten sähkökiskoja, seinäverhouksia ja lämpösäteilijöitä. Palon syy ei selvinnyt vertailutapauksessa, mutta artikkelissa tuodaan esille, että johdinvauriot olivat todennäköisesti palon aiheuttamia. Johtopäätöksenä esitetään että alumiinin mahdollinen vaikutus kuparijohtimen vaurioihin on otettava huomioon, ja että vauriot ovat silloin tulipalon aiheuttamia eivätkä liity paloa aiheuttavaan ilmiöön.

Beland ja Saucier (1986) ovat myös tehneet kokeita pistorasioilla, joissa alumiini- tai kuparijohtimet olivat yhteydessä messinkiruuveihin. Pistorasiat sijoitettiin pieniin puupaloihin, joiden halkaisija oli noin 20 cm ja liekkien korkeus noin 10 cm. Alumiinijohdinkokeissa havaittiin vaurioita joissakin ruuveissa noin 20 minuutin jälkeen, kun taas jotkut ruuvit säilyivät koskemattomina. Oli tapauksia, joissa toinen ruuvi oli kokonaan hävinnyt, mutta toisessa ruuvissa, 1 cm:n päässä, ei ollut vaurioita ollenkaan lukuun ottamatta värimuutoksia. Kokeissa pistorasiat olivat palavien puiden päällä eikä seinään kiinnitettynä kuten todellisuudessa. Seinään kiinnitettynä hajoamisprosessi olisi hitaampi, mutta toisaalta palon kiivaus on suurempi todellisessa palossa kuin tehdyissä pienkokeissa.

Kuparijohdinkokeissa ei havaittu vaurioitumista koska pienissä koepaloissa ei saavutettu messingin sulamislämpötilaa.

Tutkimuksessa tuodaan esille erilaisten matalien sulamislämpötilojen materiaalien, kuten alumiinin ja sinkin, mahdollinen esiintyminen nykyajan rakennuksissa. Tulipalossa nämä sulavat ja saattavat tulla kontaktiin kuparijohtimien kanssa. Sinkin sulamislämpötila on 420 °C ja kiehumislämpötila on 910 °C. Siten on mahdollista että sinkki höyrystyy tulipalossa, virtaa kaasuna tietyn matkan, tiivistyy nesteeksi ja sekoittuu kupariin muodostaen messinkiä. Tämä aiheuttaa usein kuoppautumista kuparijohtimiin, joka saatetaan tulkita väärin korroosiovaurioksi tai sähkön aiheuttamaksi ilmiöksi niin kuin valokaari tai kuumentunut liitos.

Kirjoituksessa mainitaan että joissakin palonsyykirjoissa esitetään virheellisesti, että ainoastaan sähköiset ilmiöt voivat aiheuttaa huomattavaa vahinkoa tiettyyn kohtaan ja hyvin vähäisiä vahinkoja kohdan välittömässä läheisyydessä. Kuten edellä on esitetty, tulipalo voi tietyissä olosuhteissa aiheuttaa pienellä alueella hyvinkin suuria eroavuuksia metallien vaurioissa, ilman että sähkövirta kulkee metallikappaleessa.

3.4 OIKOSULUT, MAASULUT JA VALOKAARET

3.4.1 Oikosulut ja maasulut

Oikosulku tapahtuu kun virtapiirin jännitteiset virtajohdot eristys- tai muun vian takia joutuvat sähköiseen (galvaaniseen) kosketukseen keskenään tai nollajohdon 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.

3.4.2 Epätäydellinen oikosulku vastuksen kautta

Jos oikosulkukohdassa 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 ei ollenkaan, jos oikosulkuvirta on alhainen.

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

3.4.3 Valokaari

Valokaarioikosulussa sähkövirta kulkee johtimien välillä niiden koskettamatta toisiaan. Varauksen kulku johtimien välillä tapahtuu johtumalla ionisoituneessa plasmassa. Ilmiö on sama kuin kaarihitsauksessa. Sähkövirta valokaarella rajoittuu kaaren vastuksen mukaan ja sulake saattaa reagoida oikosulkuun huomattavan hitaasti tai ei ollenkaan. Valokaarella voi vapautua hyvin suuri energia lyhyessä ajassa ja valokaaren lämpötila voi olla 3000 ... 4000 °C. Valokaari saattaa kestää sekunteja, ja syttymisen mahdollisuus on huomattava.

Vaihejohtimen ja maan välisessä kontaktissa valokaari ei yleensä ehdi syntyä ennen kuin sulake toimii (Erlandsson ja Strand 1983). Irtokosketuksessa tai löysässä liitoksessa virrankuluttaja rajoittaa virran kulkua, jolloin valokaari voi

syntyä ilman, että sulake toimii (Erlandsson ja Strand 1983). Belandin (1982a) mukaan on pieni todennäköisyys, että valokaari kotitalousolosuhteissa sytyttää tulipalon ja että valokaarijäljet palojäännöksissä ovat useimmiten tulipalon aiheuttamia.

Siten valokaari voi sytyttää tulipalon. Jos sähköjohdoissa kulkee virta palon aikana, niin 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. On kuitenkin huomattava, että kupari-alumiiniseoksilla on alhaisempi sulamislämpötila, katso kohta 3.3.

Ongelmaksi jää silloin, ovatko valokaarijäljet ensisijaisia eli paloa aiheuttaneita vai toissijaisia eli palon aiheuttamia. Ongelmalle ei ole varmaa vastausta, vaikka kirjallisuudessa on esitetty erilaisia vaihtoehtoja, joista Augerelektronispektroskopia vaikuttaa lupaavimmalta menetelmältä.

3.4.4 Ensi- ja toissijaisten valokaarijälkien tutkiminen Augerelektronispektroskopiolla

Yhdysvalloissa ovat Thaman ja MacCleary vuonna 1980 patentoineet menetelmän sähköjohtojen ensi- ja toissijaisten valokaarijälkien erottamiseksi (Jonson 1993). Sähköjohtimissa käytetään hyvin puhdasta, hapetonta johtokuparia. Kun kupari sulaa sähköpurkauksessa vapautuvan korkean paikallisen energian takia, ympärillä olevat kaasumaiset alkuaineet kulkeutuvat sulaan. Kun pieni sulanut kuparialue nopeasti jähmettyy valokaaren sammumisen jälkeen kuparisulaan kulkeutuneet aineet jäävät sinne ja muodostavat siten kuvauksen kaasumaisen ympäristön koostumuksesta valokaaren aikana.

Thamanin ja MacClearyn menetelmän lähtökohta on, että kun toissijaiset vauriot tapahtuvat tulipalossa, happipitoisuus johtimen ympäristössä on pienempi kuin ensisijaisten vaurioiden ympäristössä ennen tulipaloa. Tutkimalla hapen syvyysjakaumaa valokaarijäljessä voitaisiin siten saada tietoa siitä, onko valokaari tapahtunut ennen tulipaloa vai sen aikana. Patentissa esitetään (Anderson ym. 1993), että jos happipitoisuus on alhainen ja huippuarvot ovat alle noin 20 nm:n syvyydellä, palo on aiheuttanut valokaaren, koska jälki on syntynyt ympäristössä jonka happipitoisuus on normaalia alhaisempi. Korkeammat happipitoisuudet, joiden huippuarvot ovat syvyydellä 20 - 200 nm, viittaavat siihen että valokaari on aiheuttanut tulipalon, koska jälki on syntynyt suhteellisen happirikkaassa ympäristössä.

Menetelmässä mitataan hapen syvyysjakaumaa johtimessa Augerelektronispektroskopiolla, jolla voidaan tutkia pinnan koostumus noin 1 - 5 nm-paksuiselta syvyydeltä. Argonatomisuihkulla viipaloidaan pois ohuita kerroksia valokaarijäljen pinnasta jolloin voidaan tutkia näytettä myös syvemmillä. Näytteen ulointa pintakerrosta, noin 2,5 - 5,0 nm, pidetään saastuneena ja yleistä paloympäristöä kuvaavana. Tämän alapuolella pitoisuusjakaumat vastaavat ympäristön koostumusta valokaaren aikana.

Robertsson ym. (1988) ovat tehneet kokeita Augerelektronispektroskopiolla ensi- ja toissijaisilla valokaarijäljillä, mutta eivät ole saaneet selviä eroja happijakaumissa erityyppisten vaurioiden välillä. Heidän johtopäätöksessään todetaan, että menetelmä ei ole täysin luotettava ja että happipitoisuudet riippuvat enemmän näytteen lämpötilahistoriasta ennen palon alkua ja syttymisen jälkeen kuin siitä, onko vaurio ensi- vai toissijainen.

Anderson (1989) ja Anderson ym. (1992, 1993) ovat Augerelektronispektroskopiolla selvittäneet paitsi happijakaumia myös muita palamisen yhteydessä syntyneiden alkuaineiden jakaumia, kuten hiili, kloori, rikki ja kalsiumi. Koska hiili ei liukene kupariin, hiilen esiintyminen syvällä kuparissa edellyttää että hiili on peräisin kaasumaisista palamistuotteista jotka ovat tunkeutuneet kuumaan kuparisulaan. Jos syvällä kuparissa on hiiltä, se osoittaa että palo oli alkanut ennen valokaaren muodostumista. Jos samanaikaisesti kuparissa on vähän happea ja runsaasti kaapelin eristeestä tulevia aineita, kuten klooria ja kalsiumia, se tukee olettamusta että tulipalo on ollut valokaaren syy. Päinvastainen tulos, vähän hiiltä, kalsiumia ja klooria, joka esiintyy lähellä valokaarijäljen pintaa, ja syvälle kupariin ulottuva runsas happipitoisuus, tukee oletusta että valokaari on tapahtunut ennen tulipaloa.

Anderson suhtautuu hyvin positiivisesti menetelmän mahdollisuuksiin ja menetelmän tuloksia on hyväksytty oikeuskäsittelyissä Kalifornian ja Washingtonin osavaltioissa (Anderson ym. 1993). Julkaisuissa on kuitenkin vain muutama tutkittu esimerkkitapaus tulkintoineen, ja pitempiä koesarjoja joissa tutkittaisiin ensi- ja toissijaisia valokaarivaurioita tulipalo-olosuhteissa kaivattaisiin menetelmän yleispätevyyden selvittämiseksi.

3.4.5 Muita tutkimuksia

Oikosulut

Oikosulun (Erlandsson ja Strand, 1983, 1984/1985) jättämä jälki on tunnusomainen kraaterimainen muodostuma jonka pinta on huomattavan rosainen, siinä on usein monta huokosta ja pisananmuotoisia muodostumia kohdissa missä paikallista sulamista on tapahtunut (Erlandsson ja Strand, 1983). Usein esiintyy paikallista johtimien yhteensulamista. Vaiheen ja maan oikosulussa vaurion suuruus riippuu jännitteen vaiheesta ja voi vaihdella huomattavasti. Vaihejohtimien välisissä oikosuluissa vauriot ovat aika lailla samanlaajuiset. Lämpötilat saattavat nousta hyvin korkealle, mutta koska oikosulun kesto on hyvin lyhyt, niin syttymisvaara on alhainen jähmeissä aineissa. Jos ympäristössä on palavia kaasuja, höyryjä, tai pöly-ilmaseoksia syttymisen mahdollisuus on huomattava.

Oikosulkukohtia tutkittiin pyyhkäisyelektronimikroskopilla yhdistettynä energiadiispersiiviseen röntgenanalyysiin seuraavilla paljaan kuparijohtimen näytteillä:

- a. oikosulku, jonka jälkeen 1 min puupalossa (ensisijainen vaurio)

- b. oikosulku puupalossa, jonka jälkeen hehkutus palossa 30 s (toissijainen vaurio)
- c. kuten a, mutta puupalossa oli PVC-putki
- d. kuten b, mutta puupalossa oli PVC-putki

Systemaattista eroa tapausten a ja b välillä ei havaittu, mutta tapauksissa c ja d havaittiin voimakas kloorisignaali pinnan valtaosasta.

Tapausten d näytteiden pinnalla oli tunnusomaisia hiukkasia, halkaisijaltaan noin 2 μm . Hiukkaset sisälsivät enemmän klooria kuin johtimen muu pinta ja esiintyivät ainoastaan tapauksissa d. Havaintoa tarkistettiin 25 eri näytteen sokkotestissä, jossa pystyttiin tunnistamaan 50 % näytteistä jotka olivat oikosuljetut PVC-muovia sisältäneessä palossa. Missään tapauksessa ei havaittu vastaavia hiukkasia näytteissä, jotka olivat oikosuljetut ennen paloa tai palossa, jossa ei ollut PVC-muovia. Samanlaisia hiukkasia esiintyi, jos oikosulku tapahtui väkevän suolahappoliuoksen pinnan yläpuolella. Kokeissa, joissa PVC-muovilla eristetty johdin oikosuljettiin joko poistamalla eriste mekaanisesti terävällä metallireunalla (ensisijainen vaurio) tai polttamalla eriste (toissijainen vaurio) pois, havaittiin vastaavia hiukkasia molemmissa tapauksissa. Eristeen höyrystyminen aiheutti siis molemmissa tapauksissa saman ilmiön kuin kokeissa, joissa paljas kuparijohdin oikosuljettiin PVC-savussa.

Valokaaret

Pisaranmuodostumat voivat johtua sähköisistä syistä kuten valokaari tai ylikuormittuminen, mutta myös tulipalon korkeista kuparin sulamislämpötilan ylittäneistä lämpötiloista. Erlandsson ja Strand (1983, 1984/1985) esittävät seuraavia eroja eri tavalla muodostuneiden pisaroiden välillä:

Makrorakenne:

- Valokaari: pisaran muoto on lähes pallomainen, pisaran alaosassa on usein kovera kohta.
- Lämpeneminen ylikuormituksesta: pisara on usein soikea ja pisaran päässä on selvä kärki johtimen pituussuunnassa. Jos ylikuormittunut johdin on samanaikaisesti ollut kaasuliekissä, niin terävän kärjen muodostuminen voimistuu.
- Kuumentaminen kaasuliekissä: siirtymä johdin-pisara on tasaisempi eikä niin selvä kuin edellisissä tapauksissa; selvää kärkeä tai koveraa kohtaa ei ole.

Mikrorakenne, pisaran poikkileikkauksesta tehtyjä havaintoja optisella mikroskoopilla:

- Valokaari ilmassa: pisarassa on suuri määrä epätasaisesti jakautuneita erikokoisia huokosia, jotka ovat keskittyneet pisaran sulamattomaan johtimeen rajoittuvaan osaan, selvä ero pisaran ja sulamattoman johtimen välillä johtuu sulan pisaran hapettumisesta.

- Valokaari kaasuliekissä: pisarassa on erilainen huokosrakenne kuin kohdassa a, keskimäärin suurempia huokosia, jotka ovat tasaisesti jakautuneet poikkipinnan yli, ei kontrastia pisaran ja sulamattoman johtimen välillä.
- Ylikuormittuminen ilmassa: huokokset puuttuvat kokonaan, joissakin tapauksissa näkyy kontrasti sulamattoman ytimen ja ympäröivän sulaneen aineen välillä.
- Ylikuormittuminen kaasuliekissä: melko rajoitettu, suurten huokosten esiintyminen, huokosrakenne muistuttaa suuresti valokaari kaasuliekissä-tapauksia. Ei kontrastieroa poikkileikkauksen pinnan yli.

Happipitoisuus sulaneissa kuparipisaroissa

Robertsson ym. (1988) arvioivat metallimikroskoopilla happipitoisuuksia sulaneissa pisaroissa ensisijaisesti vertailemalla pisaroiden poikkileikkauksia referenssikuviiin. Pisarat synnyttiin kaasuliekissä, valokaarissa, löysissä liitoksissa ja läpilyönneissä. Läpilyöntikokeissa virralliset johdot, jännite 220 V ja virta 21 A, lämmitettiin kuumailmapuhaltimella eristeen sulamiseen asti. Sen jälkeen johdot koskettivat toisiaan (ensisijainen vaurio) tai virralliset johdot sijoitettiin päällekkäin ristiin puupalon liekkeihin (toissijainen vaurio). Vertailumenetelmä soveltuu tekijöiden mukaan hyvin näytteille, joiden happipitoisuus on vakio. Raportissa tutkituissa näytteissä happipitoisuus vaihteli kauttaaltaan. Työn tuloksena esitetään, että ensisijaisten vaurioiden pisaroissa on keskimäärin suurempi happipitoisuus kuin toissijaisten vaurioiden pisaroissa. Hajonta oli kuitenkin yleensä suuri ja ainoastaan ääritapaukset olivat selvästi määritettävissä. Löysien liitosten tapauksissa ensi- ja toissijaisten vaurioiden pisaroissa oli usein likimain sama happipitoisuus.

Robertsson ym. vertailivat myös huokosrakennetta eri läpilyöntinäytteissä. He päätyivät tulokseen että huokostiheys ja -jakauma voivat vaihdella huomattavasti pisaroissa, jotka ovat syntyneet samantyyppisessä vauriossa. Tämä pätee sekä ensi- että toissijaisissa vaurioissa. Lisäksi näytteen metallografinen valmistus voi vaikuttaa pinnan ulkonäköön, mikä vaikeuttaa edelleen huokoisten arviointia. Robertson ym. eivät suosittele huokosrakenteen käyttöä ensi- ja toissijaisten vaurioiden erottamiseen. Tämä kumoaisi siis Erlandssonin ja Strandin (1983, 1984/1985) tekemät arviot erityyppisistä huokosrakenteista erityyppisissä vaurioissa.

Belandin lehtiartikkelit oikosulku- ja valokaarijäljistä, ylikuormitus

Tulipalon jälkeen havaitaan yleensä oikosulkujen ja valokaarien jälkiä. Kokemusperäisenä tietona Beland (1980) esittää että tulipalotilanteissa syntyneet valokaaret ovat kyenneet sulattamaan johdotusta usean cm:n ja jopa dm:n matkalta. Usein nämä tilanteet eivät aiheuttaneet sulakkeiden toimimista, vaikka sulakkeet ovat olleet kunnossa.

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.

Sen sijaan tulipalotilanteissa kaapeleiden eristemateriaalien sähkönjohtavuudessa tapahtuu muutoksia, jotka helpottavat 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. Siten valokaaren esiintyminen olisi todennäköisesti lämpenemisen seuraus. Lämpeneminen taas voisi johtua tulipalosta tai jostakin toisesta ilmiöstä, esim. sähkövirrasta.

Täydellisen oikosulun jälkeen tavanomaisissa kotitalousolosuhteissa sulamisjäljet ovat olleet erittäin paikallisia ja rajoittuneet kosketuskohtaan. Kokeissa (Beland 1981), joissa piirin suojaus oli enintään 30 A, täydellisten oikosulkujen aiheuttamat jäljet johtimissa olivat yleensä pintapuolisia kuoppia.

Belandin johtopäätös on, että löydettyä tavonomaisissa kotitalousolosuhteissa pitkiä (yli muutamien millimetrin pituisia) sulaneita johdinosia tai johtimia ympäröiviä sulaneita putkenosia, valokaari on ollut tulipalon aiheuttama eikä tulipalon syy. Delplace ja Vos (1983) ovat samaa mieltä, mutta eivät pidä sitä ehdottomana sääntönä.

Beland on suorittanut (1982a) kokeita erilaisilla kaapeleilla ja johtimilla oikosulkujen ja valokaarien tutkimiseksi. Kokeiden perusteella hän esittää seuraavan yhteenvedon:

1. Valokaari jättää useimmiten pyöreän pisaran johtimen päähän. Johtimen sulatus voimakkaalla virralla aiheuttaa joskus suipon kärjen. Samanlaisia pisaroita saadaan aikaan asetyleeniliekillä.
2. Jos tiedetään varmasti, ettei palon voimakkuus riittänyt sulattamaan kuparia, sulamisen esiintyminen on osoitus valokaaresta. Belandin mukaan kupari ei yleensä sula huoneistopaloissa. Jos valokaari on silloin tuhonnut kaapelia joltakin matkalta, se on lähes varma osoitus siitä, että valokaari on palon aiheuttama eikä päinvastoin. Naulan esiintyminen kaapelissa ei ole riittävä osoitus sähköisestä palonsyystä. Valokaaren esiintymisen mahdollisuus normaaliolosuhteissa on pieni. Vaikka valokaari saataisiin aikaan keinotekoisesti, on epätodennäköistä, että valokaari sytyttäisi jähmeää puuta palamaan, jos virtapiiri on suojattu tavanomaisella tavalla 15 A:n tai jopa 30 A:n sulakkeella.
3. Yhdysvaltalaisen sähköohjeen NEC:n (National Electric Code) mukaisilla sähkövirroilla kaapeli lämpenee noin 10 °C ympäristöön nähden. Jos kaapeli on termisesti eristetty, lämpötilan nousu on noin 25 °C. Jotta lämpötilat nousisivat vaarallisen korkealle, ylikuormituksen tulee olla 4 - 6 kertaa normaalivirtaa suurempi, jos kaapeli on normaaliympäristössä. Jos kaapeli on hyvän lämpöeristeen ympäröimä, vastaavat kertoimet ovat 2 - 3. Ylikuormituksen keston tulee olla pitkä.

4. Kuparijohdin tulee hauraaksi, jos sitä ylikuormitetaan pitkäksi ajaksi lähelle sulamislämpötilaa. Tästä ei voida tehdä erityisiä johtopäätöksiä, koska muut lämmönlähteet aiheuttavat saman ilmiön.

Yleensä Beland (1982a) suhtautuu epäillen palotilastoissa esiintyviin sähköisten palosyiden suureen lukumäärään. Syitä tähän ovat mm. että sähköisen syyn ilmoittaminen on ollut tapa välttää selvittämättömiä tapauksia. Usein on yhtä vaikeata osoittaa että, sähköinen syy on poissuljettu kuin että syttymissyy varmasti on liittynyt sähköön. Lisäksi on usein vaikeata erottaa ensi- ja toissijaiset sähköiset vauriot.

Belandin arvion mukaan (1982a) alle 1 % valokaari- tai oikosulku tapauksista normaaliolosuhteissa sytyttää tulipalon, jos vieressä on jähmeää puuta.

Beland on itse tutkinut muutama sata palopaikkaa, joissa on epäilty sähköistä syttymissyytä. Niistä vain pieni osa oli todella sähköistä alkuperää. Todellisten syttymissyiden joukossa olivat huonosti suunnitellut laitteet, lasten tulitikkuleikit, huonosti sijoitetut lämmityslaitteet ja tuhotyöt. Useimmissa tapauksissa syttymiskohdan läheisyydessä löytyi valokaareen viittaavia jälkiä. Esimerkkinä mainitaan (Beland 1982a) tapaus, jossa jalkalistan takana oli kaapeli seinän ja lattian yhtymäkohdassa. Valokaaren jälkiä esiintyy kohdassa, jossa naula oli lyöty jalkalistan läpi. Valokaari oli sulattanut johdinta noin 5 cm:n matkalta eikä vaurioiden takia selvinnyt, oliko naula mennyt kaapelin läpi. Palojäljet osoittivat kaapeliin ja selvimmät palojäljet olivat valokaarijälkien kohdalla. Piirissä ollut jännite oli 240 V ja syötti sähköä kahdelle sähkölämmittimelle, joiden yhteinen teho oli 2,5 kW. Piiriä suojasi kaksi 15 A-sulaketta. Palon syyksi tilastoitiin sähköinen vika. Myöhemmin selvisi kuitenkin että palo oli sytytetty tahallaan noin 20 litralla palavaa nestettä. Beland mainitsee myös sähköisiksi tilastoituja palonsyitä, joissa sähkö ei ollut kytkettynä kuukausiin.

Ylikuormitus ja siitä syntynyt valokaari

Grayn ym. (1983) kirjoituksessa kiinnitetään huomiota sähköisten palonsyiden suureen osuuteen, noin 30 %:iin, Ison-Britannian palotilastoissa. Sähköpalojen osuus on kirjoituksen mukaan liioiteltu ja esimerkiksi sähkön tai sähkölaitteiden väärinkäyttö on virheellisesti luokiteltu sähköisiksi, kuten rasvakattilapalot sähköliesitapauksissa. Palojäännösten väärintulkinta johtaa myös usein virheellisiin johtopäätöksiin.

Yksi mekanismi on johdotuksen ylikuormitus, jonka jälkeen johtimien eristys sulaa ja voi seurata oikosulku tai valokaari. Sama tulos saadaan kuitenkin, kun virrallinen johdin joutuu tulipaloon. Sulan kuparin pisaranmuotoiset jäljet näyttävät samanlaisilta silmämääräisessä tarkastuksessa.

Gray ym. (1983) tekivät kokeita, joissa PVC-muovilla eristetty kaksijohdin-kaapeli, jonka normaali käyttövirta oli 5 A, ylikuormitettiin sähkövirralla. Havaittiin, että huomattavia ylikuormitusvirtoja, yli noin 35 A tarvittiin 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. Hitaalla lämmityksellä (alle 40 A:n virtoja) valtaosa pyrolyysituotteista hävisi eristeistä ennen oikosulkua. Jos kaapeli peitettiin matonpalalla, lämmön eristys edisti tapahtumia, kasvaneen palavan aineen määrä kaapelin ympärillä teki myös syttymisen todennäköisemmäksi. Oikosulku tapahtui nyt pienemmillä virroilla, mutta huomattavaa ylikuormittumista (yli 30 A) tarvittiin nytkin palon syttymiseksi.

Jos sama kaapeli virrallisena sijoitettiin pienen bensiinilammikkopalon yläpuolelle, oikosulku tapahtui noin 60 s sen jälkeen, kun eriste oli palanut pois, jopa kaapelin normaalilla käyttövirralla 5 A.

Syntyneitä sulan kuparin pisaroita tutkittiin pyyhkäisyelektronimikroskoopilla. Yli 500 kerran suurennoksella havaittiin eroja sähköisesti ylikuormitettujen ja tulipalossa oikosuljettujen jälkien välillä. Sähköisesti ylikuormitettujen jälkien pinnassa oli neliön tai suorakaiteen muotoisia kuvioita, joita ei esiintynyt tulipalossa oikosuljetuissa johtimissa. Jälkien syntymekanismia ja tulkintaa jätettiin tässä kirjoituksessa tulevien tutkimuksien varaan.

Valokaarijälkien ja mekaanisten vaurioiden vertailu

Ettling (1981) on tutkinut valokaarijälkien ja mekaanisten jälkien eroja sekä johtimen mahdollista lämpenemistä jäljen kohdalla, jossa johtimen poikkipinta-ala on pienentynyt. Valokaarijäljet ja mekaaniset jäljet voidaan yleensä erottaa toisistaan. Valokaarijälki on usein paikallinen sulanut kuoppa, joka voi olla sileä tai tasainen tai siinä voi olla jähmettyneen kuparin ulkonema. Ulkonemia voi olla monta pientä, jolloin sulanut kuoppa vaikuttaa rosoiselta. Jos johdin on ollut paljaana, siinä voi olla sulan metallin roiskeita lähellä valokaarikohtaa.

Mekaanisten vaurioiden aiheuttamat kolot voivat päällisin puolin muistuttaa valokaarijälkiä, mutta tarkempi tutkimus paljastaa yleensä 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.

Jos viereisessä johtimessa on jälkiä kohdassa, jossa johtimien välillä on voinut kulkea sähkövirta, se viittaa valokaareen. Jos johtimessa on selvä valokaaren jälki, mutta ei löydy kohtaa, johon valokaari olisi voinut kulkea, on mahdollista, että vastakohta on ollut alumiinista tai sinkistä, joka yleensä sulaa ja häviää tulipalossa.

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, joka siirtää ylimääräistä lämpöenergiaa vaurioitumattomiin johtimen osiin.

Beland (1982b) on tutkinut niiden vaurioituneiden johtimien lämpenemistä, joiden poikkileikkaus oli normaalia pienempi vaurion kohdalla. Kokeissa tutkittiin erilaisia vaurioita, kuten johtimia, eri olosuhteissa, joissa osa johtimesta oli poistettu, venytettyjä johtimia ja monisäikeisiä johtimia, joiden säikeistä osa oli katkaistu. Tutkimuksen johtopäätöksenä oli, että palovaarallinen ylikuumentuminen vaurioituneessa johtimessa tavanomaisissa olosuhteissa on hyvin epätodennäköistä.

Yleiskatsaus sähkövaurioista ja niiden tutkimisesta

Delplace ja Vos (1983) ovat kirjoittaneet lyhyehkön yleiskatsauksen sähkövaurioista ja niiden tutkimisesta. 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 jossa sulake on lauennut. Valokaari tai oikosulku on silloin saattanut olla palon syttymiskodan lähellä, olipa syttymissyö ollut mikä tahansa. Jos valokaarijälkiä on paljon, ensimmäisen valokaaren tapahtumapaikka saattaa olla kauimpana voimanlähteestä, joka voi olla sähköpäätaulu, paristo tai generaattori. Muut valokaaret ovat sitten tapahtuneet suojauksen laukeamatta, sitä mukaa kun palo on edennyt sähkölähdettä kohti.

Delplace ja Vos (1983) esittävät seuraavat tunnusmerkit erilaisille vauriotyypille:

Valokaarijäljet: Äkilliset poikkileikkauksen ja ulkomuodon muutokset, kuparipisarot, sulan kuparin muodostamat ulkonemat, lähellä olevien johtimien tai metallikuorien vauriot, kuparijohtimen valmistusvaiheen vedon jäljet ovat näkyvissä vauriokohtaan asti.

Lämmityksen tai seostumisen aiheuttamat jäljet, ilman sähkö vaikutusta: Kuparin valuminen tai tippuminen painovoiman vaikutuksesta, paikalliset asteittaiset paksuuntumat tai ohentumat, epäsäännölliset muodot, lähekkäisten johtimien kiinnittyminen toisiinsa, kuparijohtimen valmistusvaiheen vedon aiheuttamat pitkittäiset merkit puuttuvat. "Reikäjuustomainen" vaikutus kuparissa olevien kaasujen kehityksestä. Kuparin väri muuttuu vaaleaksi tai kellertäväksi, jos alumiini tai messinki on muodostanut sen kanssa seoksen, jonka sulamispiste on alhainen.

Delplacen ja Vosin kirjoituksessa on hieman asiaa valaisevaa kuvamateriaalia.

3.5 KUUMAT LIITOKSET

Ettling (1982) on tutkinut hehkuvia liitoksia yhdistämällä kupari- tai alumiini-johtimia nauloihin eri materiaaleista (teräs, kupari, sinkki). Puhtaiden materiaalien koskettaessa toisiaan kesti hetken ennen kuin materiaalien väliin oli kasvanut riittävä hapettunut liitoskerros, joka hehkui selvästi enemmän kuin vieressä olevat metallit. Pysyvä hekkuva liitos saatiin helposti aikaan teräsnaulan ja joko kupari- tai alumiinijohtimen väliin. Muiden metalliyhdistelmien väliin syntyi myös hekkuva liitos, mutta vaikeammin eikä yhtä pysyvästi. Hehkuvan liitoksen

syntymekanismi on alkuperäinen huono kontakti, joka lämmittää liitosta pitkällä ajanjaksolla, jolloin liitoskohtaan syntyy oksidikerros. Tämän vastus kasvaa ja lämmittää edelleen liitoskohtaa. Lopuksi syntyy hehkuva liitoskohta, joka voi aiheuttaa tulipalon. Tällaisia ovat esimerkiksi löystyneet ruuviliitokset.

3.6 KAAPELEIHIN LYÖDYT NAULAT

Ettlingin tutkimuksessa (1982) on myös käsitelty kaapeleihin lyötyjen nauhojen mahdollisuuksia aiheuttaa tulipaloa. Jos kaapeliin on lyöty naula siten, että siihen tulee lovi, mutta ei maa- eikä oikosulkuja, niin se ei aiheuta vaaratilanteita, koska poikkipinta-alan pieneneminen ei aiheuta sanottavaa paikallista lämpenemistä. Jos naula osuu kahteen johtimeen, saattaa syntyä oikosulku, joka useimmiten laukaisee sulakkeet tai valokaaren, joka saattaa sytyttää tulipalon. Jos naula pienentää johtimien välistä etäisyyttä, voi myös syntyä valokaari. Jos naula läpäisee kaapelin, piiri saattaa edelleen toimia naulasta huolimatta mutta naulan ja kaapelin väliin voi muodostua oksidikerros ja hehkuva liitos. Lämpö saattaa silloin johtua naulaa pitkin ja lämmittää materiaalia, johon naula on lyöty, esimerkiksi puu voi hiiltä. Hehkuva liitos saattaa sytyttää puusta tulevia pyrolyysituotteita.

4. TULIPALOJEN KUVAUKSIA

4.1 ASUNTOPALOJA

4.1.1 Järvenpään huoneistopalo

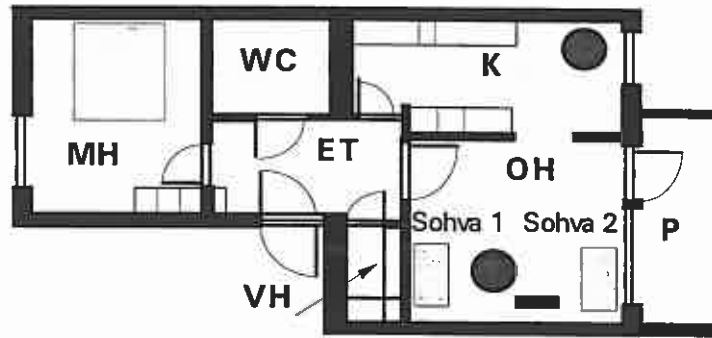
Kuvassa 4.1 on esitetty Järvenpäässä 30.7. 1988 palaneen huoneiston pohjapiirros. Yksi palomies menehtyi avatessaan huoneistossa vaatehuoneen (VH) oven, jonka sisälle oli kertynyt palon aikana pyrolyysikaasuja. Ovesta tunkeutunut pistoliekki poltti palomiehen kasvosuojusta ja kypärää niin, että hän menehtyi palovammoihin. Lisäksi toinenkin palomies sai pahoja palovammoja (Katajamäki 1989).

Tätä paloa tutkittiin sisäasianministeriön tutkintalautakunnan pyynnöstä VTT:n palotekniikan laboratoriossa sekä tekemällä rekonstruktiokeiteita (Mangs 1989) että numeerisesti simuloimalla huonepalon kehitystä (Eloranta 1989). Palo oli nähtävästi saanut alkunsa olohuoneesta (OH), jossa seurue (vähintään 2 henkeä) oli viettänyt iltaa. Ulkopuolisten henkilöiden osuutta (tahalliseen) sytyttämiseen ei voitu ennakoita sulkea pois. Kokeissa tutkittiin palon syttymistä huoneen kalusteissa, palon leviämistä ja sohvan palotehoa. Kuvassa 4.2 on esitetty sohvan palamisnopeus ajan funktiona (Mangs 1989). "Luonnollinen" syttymissyys olisi ollut humaltuneiden henkilöiden huolimaton tulenkäsittely tupakoidessa, mutta tahalliseen sytyttämiseen viittasi olohuoneen molempien sohvien ilmeisen samanaikainen syttyminen. Tutkijoita askarruttivat seuraavat kysymykset, joihin etsittiin vastausta simuloinnilla:

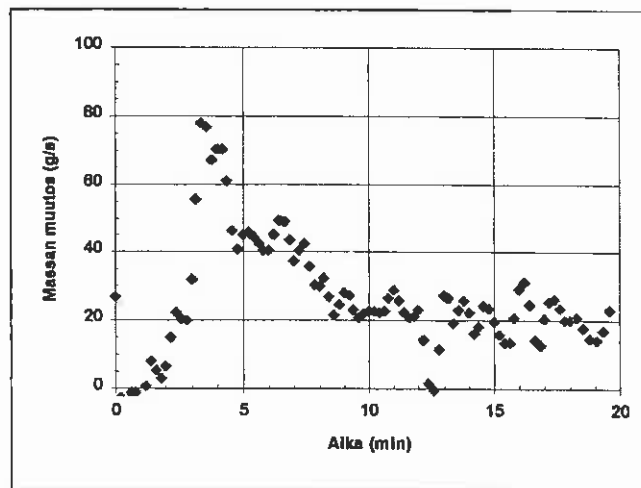
1. Kuinka suuri paloteho tarvittiin olohuoneen (OH) lieskahduttamiseen?
2. Riittikö siihen yhden sohvan palaminen?
3. Mikä vaikutus palon kulkuun oli mahdollisella parvekkeen (P) oven aukiolemisellä?

Simuloinnilla havaittiin käyttäen syötteenä kuvan 4.2 palamisnopeutta, että olohuone lieskahti vasta, kun molemmat sohvapaloivat samanaikaisesti. Oliko sytyttäjänä siis ulkopuolinen tuhopolttaja? Häntä ei tarvittu, sillä polttokokeesta paljastui uretaanitäytteen niin nopea sulaminen, että olohuoneen kovalle muovilattialle syntyi palava uretaanilammikko, joka levitti paloa parin minuutin sisällä koko olohuoneen alueelle. Siten toisen sohvan sytyttyä molemmat sohvapaloivat käytännössä lähes samanaikaisesti eikä tahallista sytyttäjää tarvittu. Lopuksi havaittiin, että parvekkeen oven auki- tai kiinnioloilla ei ollut merkittävää vaikutusta palon alkuvaiheiden kehittymiseen.

Näillä esimerkeillä voitiin Suomessa ensimmäistä kertaa osoittaa tulipalon numeerisen simuloinnin merkitys ratkottaessa palonsyyn tutkimukseen liittyviä kysymyksiä, kun laskennan syötteenä saatiin luotettavia mittaustuloksia täysmittaisista laboratoriokeiteistä.



Kuva 4.1. Huoneiston pohjapiirros Järvenpäässä 30.7. 1988 tapahtuneessa tulipalossa.



Kuva 4.2. Palavan sohvan tasoitettu massan muutos Järvenpäässä 30.7. 1988 tapahtuneen tulipalon rekonstruktiokokeessa (Mangs 1989).

4.1.2 Sähkövian aiheuttama huoneistopalo

Taustaa

Palonsyyn selvittämisessä keskitytään usein alueeseen, jossa palovauriot ovat suurimmillaan, koska syttymiskohta on usein sen läheisyydessä. Tämä palo on kuitenkin esimerkki selvityksestä, jossa ratkaisu oli suurimman vaurion alueen ulkopuolella (Goodyear 1993).

Huoneistopalo tapahtui Kanadassa Ontarion osavaltiossa Stratfordissa, osoitteessa 29 Buckingham Drive. Rakennus oli kaksikerroksinen asuintalo ja käsitti 51 yhden tai kahden huoneen asuntoa. Asukkaat olivat pääasiassa vanhuksia, jotka kuitenkin elivät itsenäisesti ilman säännöllistä avustusta eivätkä olleet hoidossa.

Palo syttyi ensimmäisen kerroksen asunnossa 126, johon kuului makuuhuone, olohuone, keittokomero ja kylpyhuone (kuva 4.3). Asunnosta pääsi lyhyen eteisen kautta rakennuksen käytävään. Asunnossa oli sähköverkkoon kytketty palo-varoitin. Rakennuksen paloilmotuslaitteistoon kuului savuilmamaisimia käytävässä.

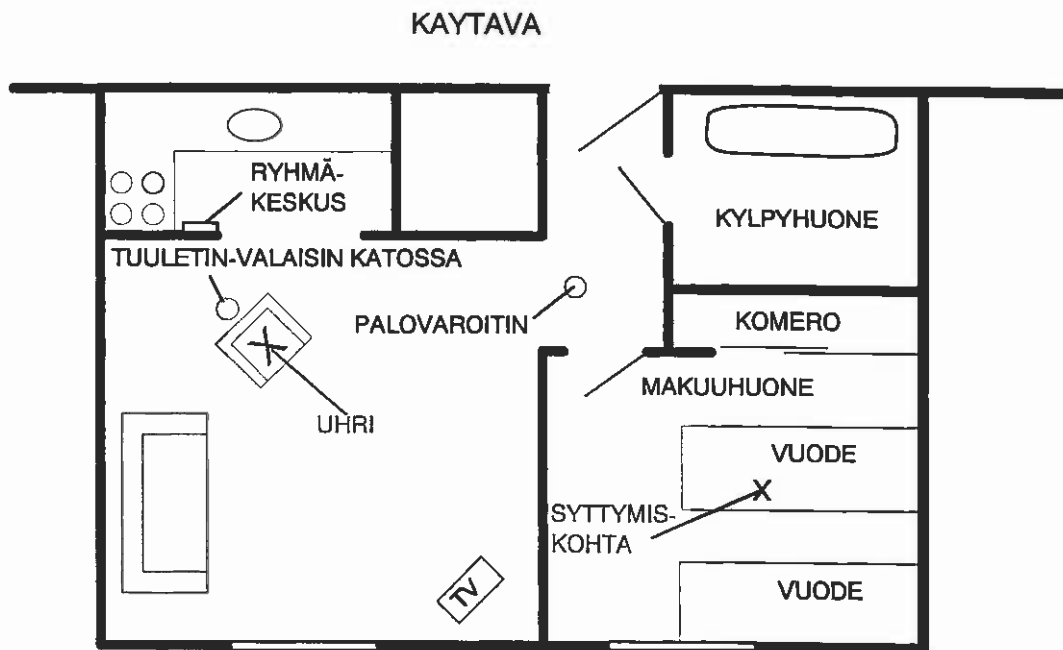
Asunnossa asui 92-vuotias nainen. Hän pystyi asumaan yksin ja valmistamaan itselleen ruoan, mutta kärsi nivelulehduksista ja liikkui hitaasti kävelykeppi apunaan.

Palotapahtumat

Käytävän savuilmaisin, joka oli lähimpänä asuntoa 126, reagoi savuun ja palokunta sai hälytyksen kello 06:33. Rakennuksen valvoja joka vaimoineen asui käytävän toisella puolella kuuli hälytyksen. Asunnon 126 ovi oli silloin raollaan, kävelykeppi kiilaantunut rakoon ja savua tuli oven raosta. Valvojan vaimo meni asuntoon 126, kohtasi savua ja näki liekeissä olevan asukkaan istuvan nojatuolissa. Nojatuoli leimahti liekkeihin sillä hetkellä. Hän yritti päästä naisen lähelle ja sammuttaa paloa huovalla, mutta joutui savun takia perääntymään käytävään. Käytävässä he sulkivat asunnon 126 ovi ja jäivät odottamaan palokuntaa.

Palokunta saapui 06:38, palomiehet menivät asuntoon 126 ja löysivät naisen pehmustetussa nojatuolissa. Sekä nojatuoli että naisen vaatteet olivat silloin tulossa. Palo sammutettiin alle kahdessa minuutissa vedellä. Nainen ei silloin osoittanut elonmerkkejä.

Asunnon 126 92-vuotias asukas menehtyi tulipalossa. Palo- ja savuvauriot rajoittuivat asuntoon 126.



Kuva 4.3. Asunnon 126 pohjapiirros Goodyearin (1993) mukaan.

Palojäljet

Palovauriot asunnossa 126 olivat suurimmat olohuoneen nojatuolin läheisyydessä. Nojatuolin yläpuolella ollut kattotuuletin ja kipsilevykatto vaurioitui myös. Palo rajoittui tähän alueeseen naisen löytöhetkellä. Pieniä määriä palanutta vaateetusta oli lattialla nojatuolin, asunnon oven ja makuuhuoneen vuoteen välisellä alueella. Naisen kävelykeppi oli oviaukossa. Koko huoneistossa oli savuvaurioita, mutta palovauriot rajoittuivat olohuoneeseen. Kankainen seinäkoriste eteisessä lähellä ovea oli jossain määrin palanut. Makuuhuoneessa oli halkaisijaltaan alle 50 mm:n kärventynyt jälki vuoteessa sähköisen lämpötyynyn kohdalla.

Sähköjärjestelmä

Asunnon ryhmäkeskus sijaitsi keittokomerossa olohuoneen puoleisella seinällä. Vain ryhmään "savuhälytys" kuuluva sulake oli toiminut.

Kiinteästi katossa nojatuolin yläpuolella oli yhdistetty tuuletin ja valaisin. Tämä oli vaurioitunut kuumuudesta ja sähköjohtojen eristeet olivat sulaneet sen sisällä. Sähköjohdot jakorasiassa valaisimen yläpuolella eivät olleet sulaneet. Laite kuului eri ryhmään kuin palovaroitin.

Palovaroittimen sähköjohdot kuljivat kaapelikanavassa olohuoneen katon pinnassa päättyen eteisen kattoon kiinnitettyyn palovaroitimeen. Kaapelikanavassa oli sähköjohtojen oikosulku nojatuolin yläpuolella.

Samaan ryhmään palovaroittimen kanssa oli kytketty kolme pistorasiaa makuuhuoneessa, kiinteä kattovalaisin makuuhuoneessa sekä kylpyhuoneen valaistus. Sähköinen lämpötyyny oli kytketty pistorasiaan makuuhuoneessa. Ryhmän kiinteissä sähköjohdoissa ei ollut sähköistä vikaa tai palovauriota, lukuun ottamatta oikosulku palovaroittimen sähköjohdossa olohuoneen katossa nojatuolin yläpuolella.

Palovaroittimen muovisen kuoren pinta oli lievästi sulanut. Palovaroittimen sähköjohdot jakorasiassa eivät olleet vaurioituneet. Palovaroitin oli asianmukaisesti kytketty. Palovaroitin todettiin toimintakykyiseksi tulipalon jälkeisissä tarkistuksissa.

Sähköinen lämpötyyny tutkittiin palon jälkeen ja havaittiin sähköinen vika liitäntäjohdossa sähkökytkimen kohdalla. Eristeen ja johtimen vaurio oli alle 10 mm pitkä. Vian rekonstruktiokeksessä syntyi valokaari ja leimahdus joka riittäisi sytyttämään puuvillan tapaista kangasmateriaalia. Todettiin myös että lämpötyynyssä oli merkintä missä varoitettiin nukkumasta tyynyn päällä.

Johtopäätökset

Puhaltimen vauriot olivat palon seuraus, samoin sähköjohtojen oikosulku kaapelikanavassa palavan nojatuolin yläpuolella.

Oikosulku kaapelikanavassa sai ryhmäsulakkeen laukeamaan ja keskeytti palovaroittimen äänimerkin.

On ilmeistä, että sähköinen vika lämpötyynyn sähköjohdossa oli sytyttänyt naisen yövaatteita. Kun hän huomasi tulipalon hän nousi vuoteesta ja käveli hitaasti makuuhuoneesta eteiseen ja avasi oven. Tuntemattomasta syystä hän kääntyi olohuoneeseen ja istui nojatuoliin, joka syttyi hänen palavista vaatteistaan.

Keskustelua

Lämpötyyny ei ollut erityisen kulunut ja tuote oli olemassa olevien standardien mukainen. Tyynyn päällä ei olisi kuulunut nukkua. Tällöin sähköjohtoihin ja liittimiin kohdistuu ylimääräisiä jännityksiä henkilön liikkeessa ja hänen painonsa siirtyessä paikasta toiseen. Tämä johtaa eristeiden ja johtimien vaurioitumiseen.

Syttymiskohdan lähellä ei muodostunut jatkuvaa paloa koska asukas ja samalla ensiksi syttynyt materiaali (yövaatteet) siirtyi sieltä pois.

Naisen palavista vaatteista pudonneiden palojäännösten muodostamat jäljet nojatuolista ovelle ja sieltä makuuhuoneeseen sekä pieni kärventynyt jälki vuoteessa olivat ratkaisevat palojäljet.

4.1.3 Valaisimen aiheuttama huoneistopalo

Kanadassa Ontarion osavaltiossa Wellingtonin piirikunnassa omakotitalo tuhoutui palossa ja neljä ihmistä menehtyi. Palon todennäköinen syttymissyy oli paljaan hehkulampun peittyminen vuodevaatteilla, jotka olivat syttyneet (McNeil 1993).

Rakennus

Yhden perheen omakotitalo oli noin 13 vuotta vanha ja sen pinta-ala noin 90 m². Kellarikerros oli rakennettu betoniharkoista, pohjakerroksen ulkoseinät olivat puurunkoiset ja niissä oli tiili-alumiiniulkoverhous. Välipohja oli puinen. Rakennuksessa oli sähkölämmitys.

Kellarikerroksessa oli askarteluhuone, makuuhuone, pesula, kylpyhuone ja varasto. Palo syttyi askarteluhuoneessa, jonka seinät ja katto oli verhottu 3 mm:n puupaneelilla. Pohjakerroksessa oli kolme makuuhuonetta, olohuone, ruokasali, keittiö ja kylpyhuone. Porraskäytävä kellarikerrokseen oli avoin ilman kerroksia erottavaa ovea.

Kellarikerroksesta oli kaksi ulospääsyä: porraskäytävää ylös ja etuovesta tai pesulan ja takaoven kautta. Pohjakerroksesta pääsi ulos menemällä portaita alas etuovelle.

Paristolla toimiva savuhälytín oli asennettu kattoon pohjakerroksen makuuhuoneiden läheisyyteen. Laite oli toimintakunnossa.

Kuvassa 4.4 esitetään pohjakerroksen ja kellarikerroksen suuntaa antava pohjapiirustus.

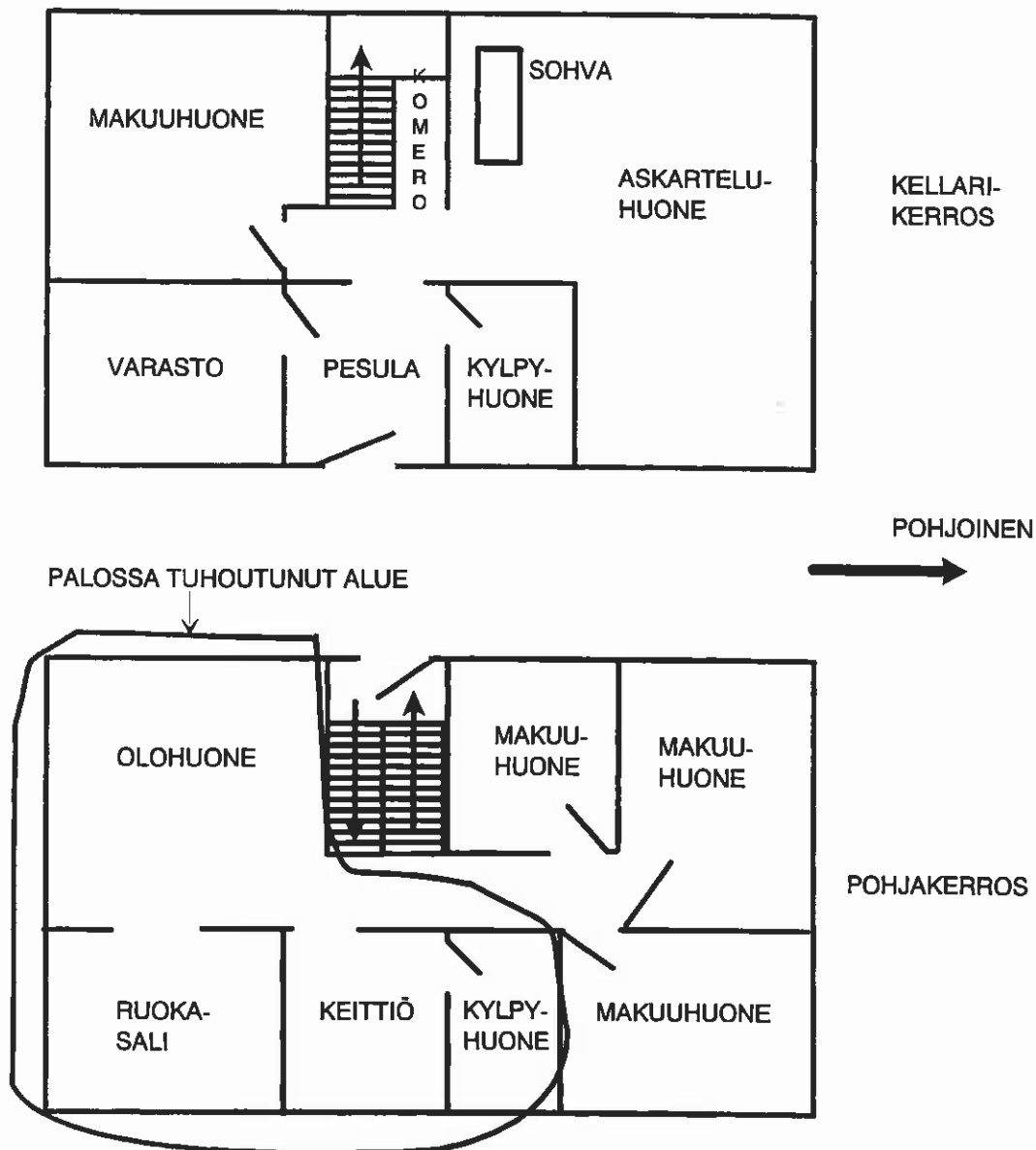
Palotapahtumat

Palon syttyessä rakennuksessa oli nelihenkkinen perhe, mies, vaimo, poika ja tytär sekä vierailulla ollut poika.

Vanhemmat olivat menneet nukkumaan noin klo 23. Silloin tytär nukkui luoteisessa makuuhuoneessa ja poika ystävänsä kanssa askarteluhuoneessa.

Muutamaa tuntia myöhemmin vanhemmat heräsivät savuilmasisimen hälytykseen. Molemmat menivät portaita alas ja kohtasivat siellä poikansa ja hänen ystävänsä menossa ylöspäin. Kellarikerroksessa pariskunta huomasi liekkejä askarteluhuoneessa sohvan kohdalla. Vaimo heitti huovan sohvan selkänojan yli, minkä jälkeen hän palasi pohjakerrokseen noutamaan tyttärtä. Mies yritti sammuttaa paloa vesisangolla, täytti sangon pesulassa, mutta ei voinut palata askarteluhuoneeseen voimakkaan savunmuodostuksen ja kuumuuden takia. Hän pelastui rakennuksesta pesulan takaoven kautta.

Epäonnistuneen pelastusyrityksen jälkeen mies hälytti palokunnan naapurista, palasi naapurin kanssa palopaikalle, mutta he eivät päässeet enää rakennukseen.



Kuva 4.4. Kellarikerroksen ja pohjakerroksen suuntaa antava pohjapiirros McNeilin (1993) mukaan.

Palokunta sai hälytyksen 02:34 ja oli 13 min:n päästä paikalla. Liekit löivät silloin etuoven aukosta (ovi oli joko auki tai palanut pois) sekä rakennuksen eteläpäästä molemmissa kerroksissa. Pohjoispään makuuhuoneiden ikkunoista tuli runsaasti savua. Palo saatiin hallintaan vasta usean tunnin työskentelyn jälkeen. Tulipalossa menehtyivät rakennukseen jääneet neljä ihmistä.

Palopaikan tutkiminen

Palovauriot olivat laajat. Rakennuksen eteläpäässä pohjakerros oli kokonaan tuhoutunut lattiasta ylöspäin.

Välipohjan pääkannatinpalkki oli hiiltynyt voimakkaasti mutta oli vielä paikallaan. Muutama seinähirsi oli vielä pystyssä, mutta lähes kaikkien yläosat

olivat palaneet pois. Lattia ja sen poikkihirret olivat tuhoutuneet. Porraskäytävän askelmat olivat hiiltyneenä paikoillaan, porraskäytävän seinät ja katto olivat tuhoutuneet. Pohjoispään pohjakerroksen lattia ja ulkoseinät olivat ehjät. Sisäpuoliset pystyhirret olivat palaneet ja hiiltyneet. Suuri osa kattorakenteista oli tuhoutunut.

Kellarikerroksen askarteluhuoneen sohvassa ja sen ympärillä oli palanut. Huoneen katto oli tuhoutunut lähes kokonaan, poikkihirret ja lattia sen yläpuolella olivat hiiltyneet voimakkaasti. Huoneen pohjoispää sohva vastapäätä oli vähiten vaurioitunut. Televisio ja videolaitteet olivat osittain sulaneet, samoin erilaiset muoviesineet hyllystössä.

Koska tulipalo oli silminnäkijän mukaan syttynyt askarteluhuoneessa, selvityksen päähuomio kohdistettiin sinne. Televisio, videolaitteisto, sähkölämmityslaitteet, katon kiinteä valaistus, seinien sähkökytkimet, pistorasiat, valaisimet, jatkojohdot ja muut näihin laitteisiin liittyvät sähköjohdot tarkistettiin mahdollisen sähköisen vian takia. Siihen viittaavaa ei havaittu.

Todettiin kuitenkin että televisio ja pieni pöytälamppu olivat olleet päällä palon aikana. Havaittiin lisäksi, että pöytälamppu oli ollut lattialla suoraan sohvan edessä. Pöytälamppu oli noin 30 cm korkea ja siinä oli ollut 100 W:n hehkulamppu ilman varjostinta. Se oli jatkojohdon kautta kytketty pistorasiaan askarteluhuoneen pohjoisseinässä.

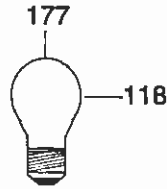
Koska mitään sähköiseen syttymissyyn viittaavaa ei havaittu pöytälampussa eikä sen johdossa, heräsi epäily, että valaisin sellaisenaan olisi voinut sytyttää paloa. Valaisin oli ollut päällä palon aikana, ja hyvin lähellä sohva. Oletettavasti sohvassa ja sen lähellä oli ollut erilaisia vanupeitteitä, tyynyjä ja lakanoita (kaksi lasta oli nukkunut huoneessa), joten oli mahdollista, että varjostamaton 100 W:n hehkulamppu olisi sytyttänyt vuodevaatteet tai pehmusteet. Teorian testaamiseksi tehtiin sarja kokeita.

Koesarja

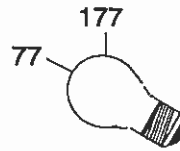
Kokeissa rekonstruointiin mahdollisia yhdistelmiä, joissa hehkulamppu oli kosketuksissa erilaisiin tekstiileihin. Kaikki tekstiilit saatiin palopaikalta: puurunkoinen polypropyleenitäyteinen ja teryleenikankainen sohva, jonka etuosaa paikattiin selkäosan ehjällä päällysteellä, puuvillalakanoita, polyesterikuitutäyteinen puuvilla-asetaattipeite, polyesteritäyteinen raionpeite sekä polyuretaanitäyteinen polyesterikankainen tyyny.

Valaisin oli noin 30 cm korkea ja siinä oli 100 W:n hehkulamppu.

Kokeissa sijoitettiin tekstiili paljaan hehkulampun viereen tai sen päälle jonka jälkeen lamppuun kytkettiin sähkövirta. Ennen koesarjaa määritettiin hehkulampun pinnan lämpötila kahdesta paikasta kahdessa asennossa (kuva 4.5).



Pystysuorassa



45 asteen kulmassa

Kuva 4.5. Ennen koesarjaa mitattuja paljaan hehkulampun pinnan lämpötiloja (°C) McNeilin (1993) mukaan.

Suoritettiin kahdeksan koetta, joissa hehkulamppu oli kosketuksessa eri tekstiileihin ja yksi koe, jossa tutkittiin sohvan syttymistä.

Kahdessa kokeessa kangas syttyi liekkeihin 6...7 minuutin jälkeen lampun kytkemisen jälkeen. Toisessa kokeessa oli puuvillalakana ja toisessa flanellilakana kaksin kerroin hehkulampun päällä.

Sohvakokeessa valaisin sijoitettiin lattialle sohvan keskikohdan eteen. Vuodevaatteet levitettiin sohvan päälle siten, että ne ulottuivat varjostamattoman hehkulampun päälle. Flanellilakana kosketti hehkulamppua. Tämän jälkeen sähkövirta kytkettiin valaisimeen. Lämpötila hehkulampun ja lakanakankaan välillä nousi 416 °C:een ja 9 minuutin 40 sekunnin jälkeen vuodevaatteet leimahtivat. Palo levisi sohvaan, joka sammutettiin 10 min:n 30 s:n kohdalla.

Keskustelua

Palonsyyn selvittämiseksi muotoiltiin käytettävissä olevan tiedon perusteella skenaario, jota testattiin rekonstruktiokeilla. Silminnäköjien lausunnon perusteella tiedettiin, missä palo syttyi: askarteluhuoneessa lähellä sohvaa. Tutkimuksissa selvisi, että sohvan edessä oli ollut varjostamaton hehkulamppu ja sohvalla vuodevaatteita. Mitään sähköiseen syttymissyhyyn viittaavaa ei löytynyt. Skenaarioksi esitettiin, että vuodevaatteet sohvalla olivat olleet kiinni hehkulampussa, kuumentuneet ja syttyneet palamaan. Palo oli levinnyt sohvaan, sieltä huoneen seinien puupaneleihin ja edelleen rakennuksen muihin osiin.

Tekstiilikoesarjan perusteella todettiin mahdollisuus, että hehkulamppu sytyttää sohvan päällä olleita tekstiilejä. Molemmista syttymistapauksissa lakanakangas oli ollut kaksinkerroin hehkulampun päällä, mikä vielä oli skenaariota. Sohvakokeessa todettiin, että palo levisi syttyneistä vuodevaatteista sohvaan.

Palon nopeaan leviämiseen vaikutti usea tekijä. Askarteluhuoneen seinät ja katto oli verhoiltu puupaneleilla. Sohva sijaitsi askarteluhuoneen toisessa päässä lähellä avointa porrasta pohjakerrokseen. Vuodevaatteiden syttymisen jälkeen sohva oli helposti syttynyt. Sen jälkeen puupaneeli oli syttynyt ja palo oli nopeasti levinnyt pohjakerrokseen avoimen porraskäytävän muodostaman hormin kautta.

4.2 AJONEUVOPALOJA

4.2.1 Henkilöautojen palokokeet

Johdanto

Vuoden 1991 alussa tehtiin VTT:n palotekniikan laboratoriossa 3 täysimittaista auton palokoetta (Mangs 1991, Mangs ja Keski-Rahkonen 1994). Kokeiden päämääränä oli mitata henkilöauton paloteho ajan funktiona. Kokeissa mitattiin lisäksi muitakin suureita. Kokeet sytytettiin melko voimakkaalla syttymislähteellä, joka varmisti, että palo kasvaisi täysin kehittyneeksi paloksi. Kokeissa ei tutkittu palon mahdollista kytevää alkuvaihetta.

Koekappaleet

Kokeissa poltetut autot olivat kaikki 1970-luvun loppupuolen tuotantoa (taulukko 4.1). Kokeen 1 auto oli kaksiovinen ja muut neliovisia. Kaikissa autoissa oli teräksinen polttoainesäiliö. Kokeessa 1 polttoainesäiliö oli tavaratilan alla, säiliön täyttöputki ja säiliöstä lähtevä polttoaineputki olivat teräksiset. Kokeessa 2 polttoainesäiliö oli takapenkin ja tavaratilan välissä, säiliön pohjasta lähti muovinen polttoaineputki ja toisesta ylänurkasta muovinen täyttöputki. Kokeessa 3 polttoainesäiliö oli tavaratilan alla, täyttöputki oli muovinen ja muovinen polttoaineputki lähti säiliön yläosasta. Autot olivat sisätiloissa 1...2 viikkoa ennen kokeita. Autoissa oli tavanomainen varustus ja 30 l bensiiniä polttoainesäiliössä. Autoissa ei ollut matkatavaroita.

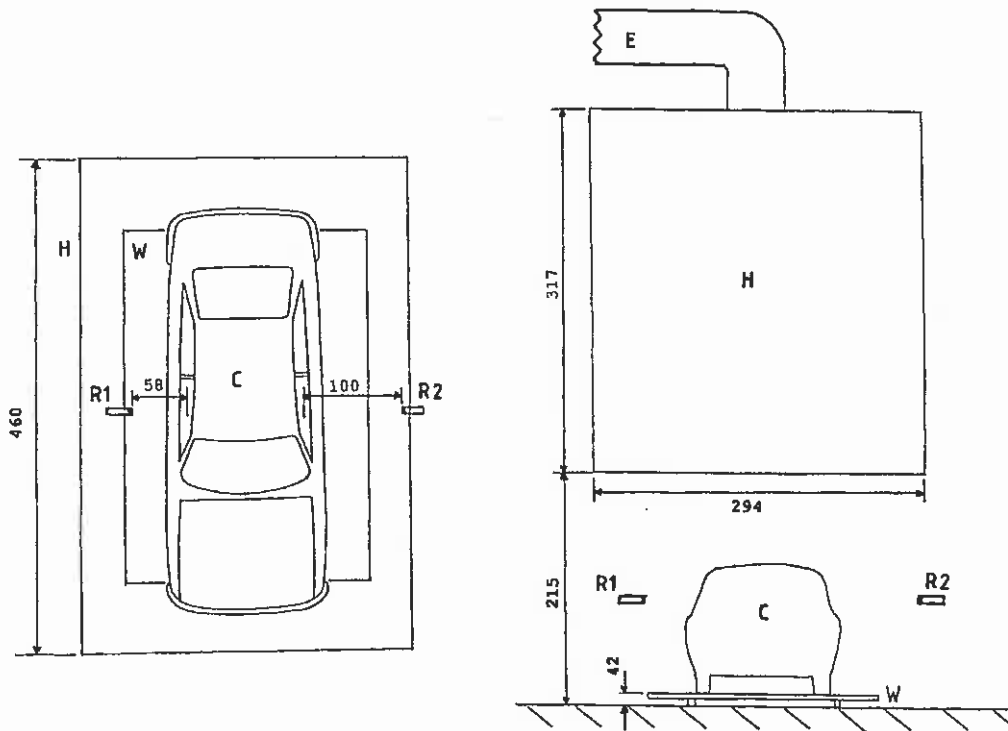
Taulukko 4.1. Palokokeiden autot

Koe nro	Automalli	Paino ilman polttoainetta ennen koetta (kg)
1	Ford Taunus 1.6	990
2	Datsun 160J Sedan	918
3	Datsun 180B Sedan	1102

Koejärjestelyt

Koejärjestelyt esitetään kuvassa 4.6. Auto C sijoitettiin punnitusalustalle W, jonka päällä oli 10 cm syvä teräskaukalo, johon kerättiin autosta valuvat nesteet. Palamistuotteet kerättiin kupuun H, jonka poikkipinta-ala oli 4,6 m x 2,9 m ja korkeus 3,2 m. Kupu liittyi kaasunpoistoputkeen E, josta kaasunäytteet kerättiin. Koe tehtiin sisätiloissa palotekniikan laboratorion sammutushallissa. Seuraavassa puhutaan auton vasemmasta ja oikeasta puolesta menosuuntaan nähden.

Kokeissa mitattiin happivaje, CO- ja CO₂-pitoisuudet, säteilyvirrantiheys kahdella anturilla, savutiheys, kaasun lämpötiloja auton yläpuolella, lämpötiloja autojen sisällä ja massan muutos. Paloteho laskettiin hapenkulutuskalorimetriperiaatteella.



Kuva 4.6. Kaaviokuva autonpolttokokeiden järjestelystä. a) sivulta, b) ylhäältä. C auto, E kaasunpoistoputki, H kaasunkeräilykupu, R1, R2 säteilyvirrantiheysanturit etuovien ikkunoiden tasolla, W punnitusalusta. Mitat cm:inä.

Sytytys

Yhdysvaltalaisen tutkimuksen (McGinley 1986) mukaan 59 % henkilöautojen paloista syttyi moottoritalasta ja 35 % matkustamosta. Tutkimus käsitteli vuonna 1973 sattuneita henkilöauto-onnettomuuksia jotka eivät johtuneet kolarista. Luvut eivät sisällä paloja, joiden syttymiskohta oli epäselvä (17 % tutkituista tapauksista). Tämän mukaisesti yksi auto sytytettiin matkustamosta ja kaksi moottoritalasta.

Kokeessa 1 auto sytytettiin 1,5 litralla heptaanilla avoimessa 30 cm x 30 cm:n astiassa joka sijoitettiin vasemman etuistuimen alle. Kokeissa 2 ja 3 sytytys tapahtui 3 litralla heptaanilla avoimessa 33 cm x 33 cm:n astiassa, joka sijoitettiin punnitusalustalle moottorin alapuolelle. Heptaanipalo 33 cm x 33 cm:n astiassa kesti 7 minuuttia ja vastaava paloteho oli arviolta noin 160 kW.

Ensimmäisen kokeen ensimmäisessä sytytyksessä auton ovet olivat kiinni ja vasemman etuoven ikkuna puoliksi auki. Toisessa sytytyksessä vasen ovi oli noin 10 cm raollaan, sen ikkuna kokonaan auki sekä oikean oven ikkuna 5 cm raollaan. Toisessa ja kolmannessa kokeessa ovet olivat kiinni, vasemman etuoven sivuikkuna kokonaan auki ja muut ikkunat 5 cm raollaan.

Autot saivat palaa, kunnes tuli oli sammunut. Mittausantureista tulevat signaalit rekisteröitiin 120 min:n ajan sytytyksestä, mikä kattoi mielenkiintoiset tapahtumat hyvin.

Tuloksia

Kuvassa 4.7 esitetään kokeissa mitatut palotehokäyrät ajan funktiona. Niissä havaitaan selvästi eri tapahtumien aiheuttamat "piikit", joista kuvatekstissä muutama esimerkki. Kokeessa 1 auto ei syttynyt kunnolla ensimmäisen sytytyksen jälkeen, vaan 15 min 45 s sytytyksen jälkeen se sytytettiin uudestaan. Nyt avattiin ovi, jolloin matkustamoon saatiin riittävästi hapetta. Palossa autot kuumenivat ja jotkut osat hehkuivat tunteja tiedonkeruun lopettamisen jälkeen. Kokeessa 3 tarkistettiin paloteho jäähtymisvaiheen aikana. Paloteho oli vielä noin 50 kW 240 min:n kuluttua sytytyksestä.

Kokeissa 1 ja 3 polttoaine paloi soihtuna täyttöputkesta, joko putken suusta (koe 1) tai polttoainesäiliön suusta sen jälkeen, kun täyttöputki oli sulanut (koe 3). Näissä tapauksissa polttoaineen palaminen kesti noin 1 h 20 min. Kokeessa 2 polttoaine valui säiliöstä punnitusalueelle säiliön alapuolella olevan muovisen polttoaineletkun sulamisen jälkeen. Tässä kokeessa polttoaine paloi sekä lammikkona auton alla että soihtuna säiliön suusta muovisen täyttöputken sulamisen jälkeen. Kokeessa 2 polttoaine paloi noin 15 min. Polttoaineen erilainen palaminen kokeissa nähdään selvästi palotehokäyristä. Kaikissa käyristä havaitaan voimakas hyppäys, kun polttoaine syttyy (kokeessa 1 noin 45 min, kokeessa 2 noin 20 min, ja kokeessa 3 noin 24 min kohdalla). Kokeissa 1 ja 3 paloteho pienenee hitaasti ja tasaisesti kun taas kokeessa 2 paloteho putoaa nopeasti polttoaineen palettua loppuun. Polttoainesäiliöt olivat ehjät kaikkien kokeiden jälkeen.

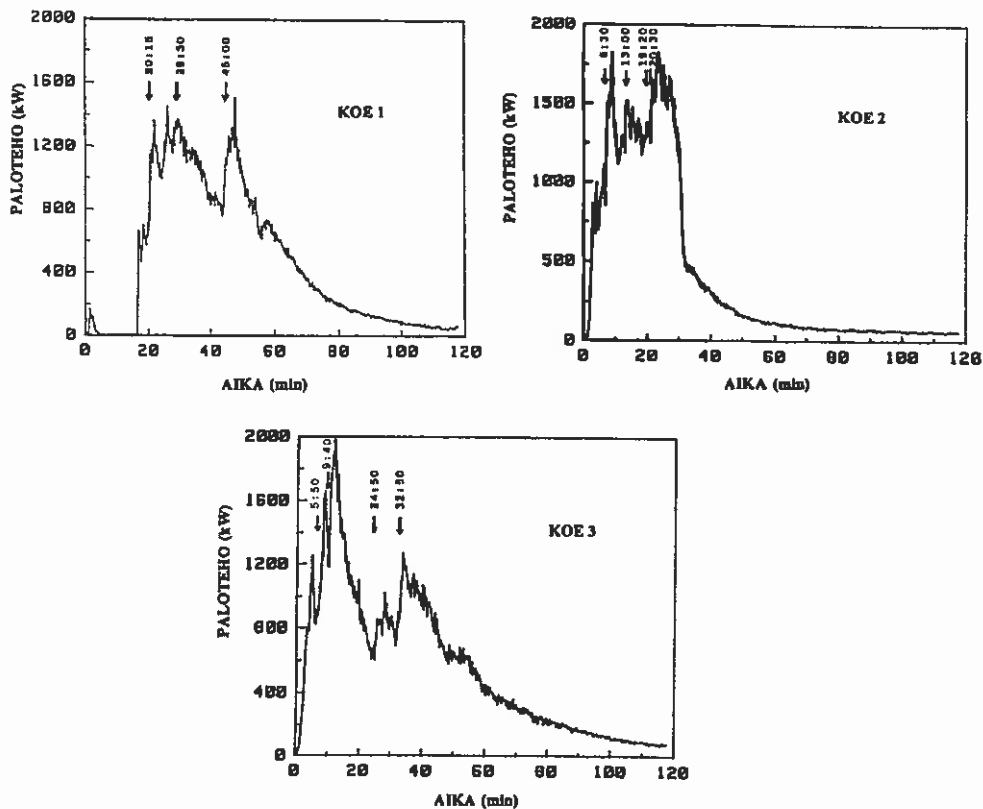
Taulukossa 4.2 esitetään massan kokonaismuutos ja 0 ... 120 min:n aikana vapautunut lämpö.

Kuvassa 4.8 esitetään esimerkkinä kaasun lämpötiloista kokeen 3 mittaustulokset, ja taulukossa 4.3 esitetään kokeen 3 aikana tehdyt havainnot.

Taulukko 4.2. Massan kokonaismuutos ja vapautunut lämpö

Koe nro	Massanmuutos (kg)	Vapautunut lämpö (GJ) 0 ... 120 min:n aikana
1	141	3.3
2	143	3.0
3	176	3.9

Palo kehittyi syttymisen jälkeen nopeasti ja rajusti kaikissa kokeissa. Savua muodostui erittäin runsaasti. Kaikki autot paloivat kokonaan loppuun kaikissa kokeissa.

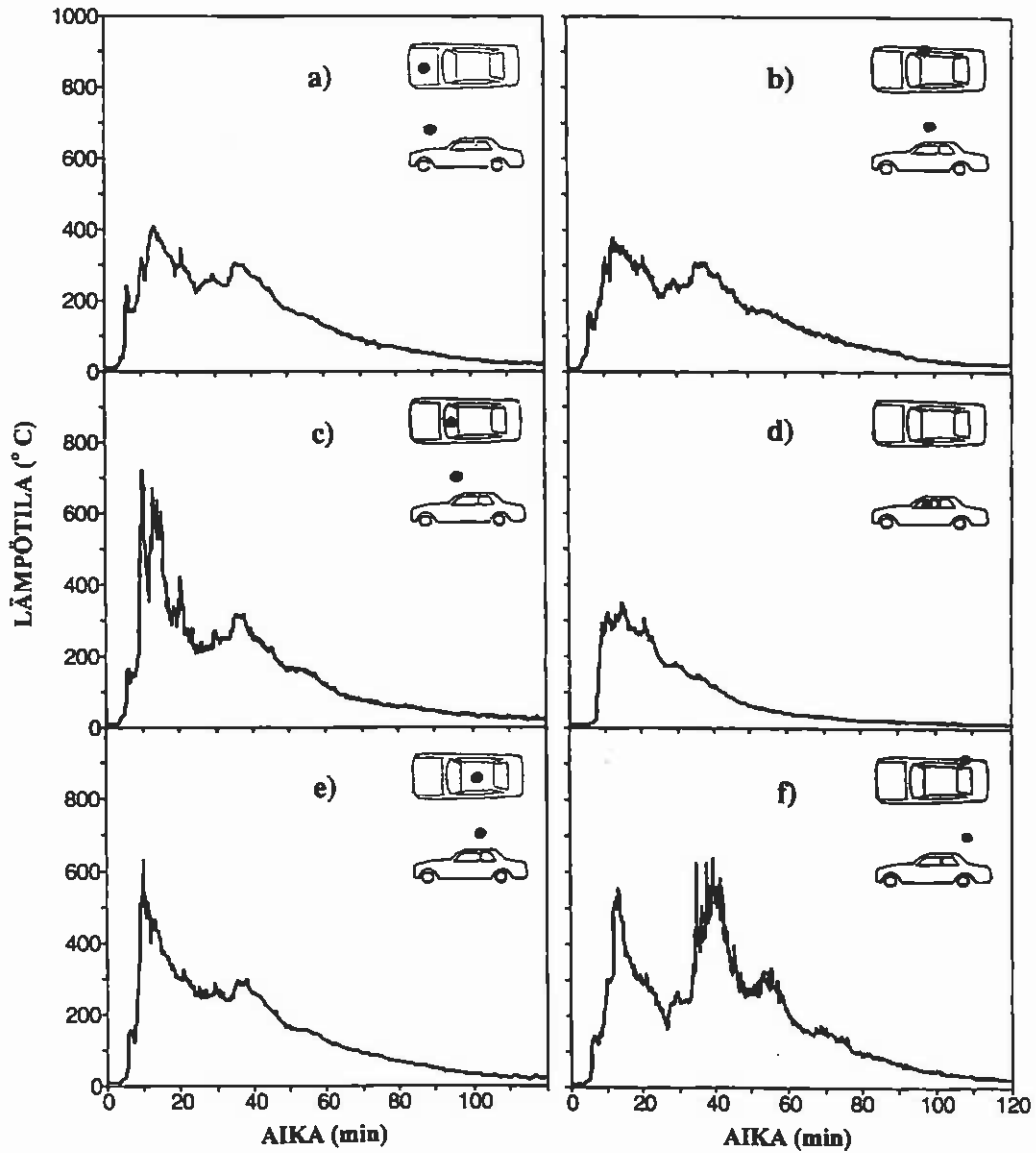


Kuva 4.7. Kokeissa mitattu paloteho. Sytytys hetkellä 0, kokeessa 1 lisäksi toinen sytytys hetkellä 15 min 45 s koska auto ei syttynyt kunnolla ensimmäisessä sytytyksessä. Seuraavat tapahtumat kokeiden aikana on merkitty nuolilla:

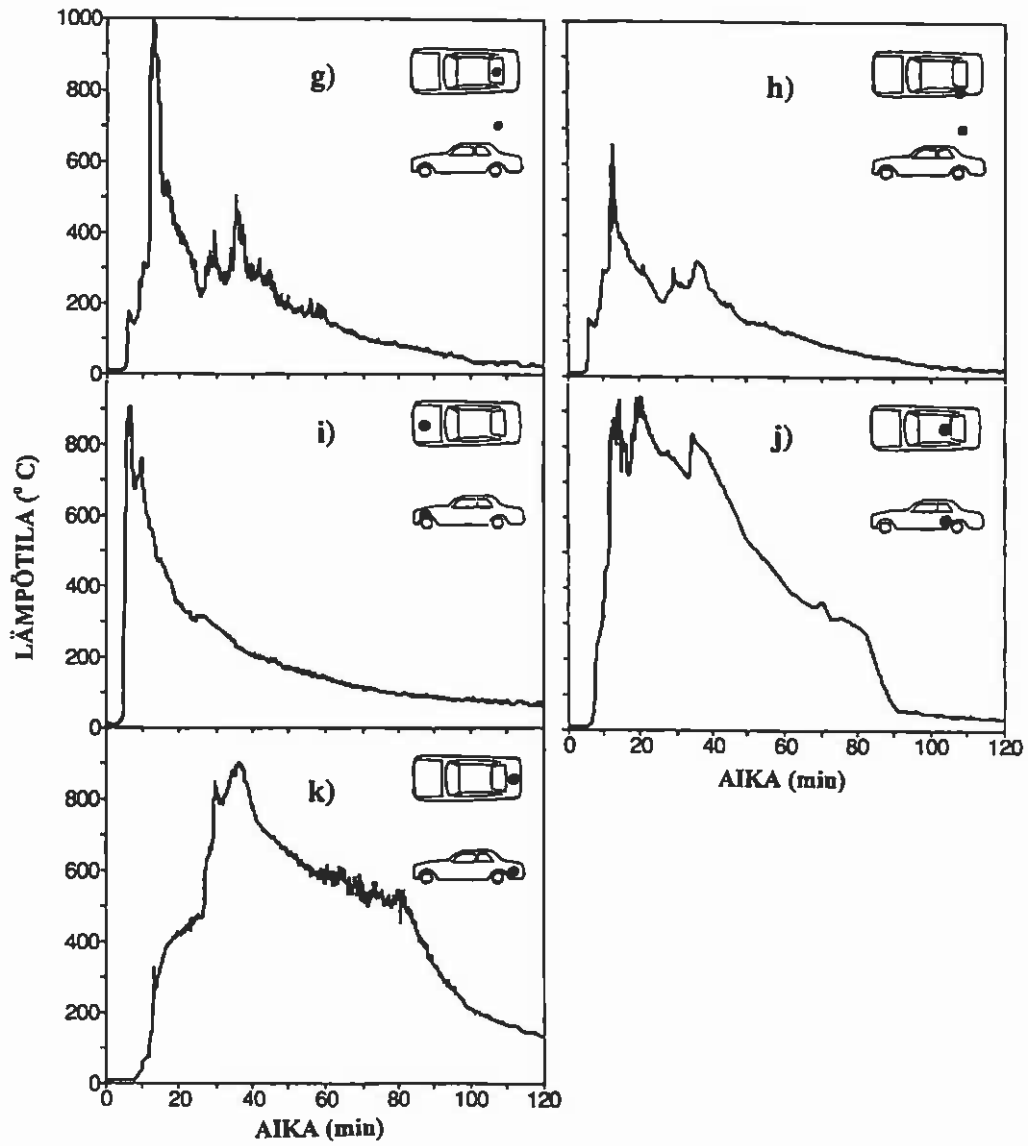
koe 1: 20 min 15 s 1/3 tuulilasista putosi, 29 min 30 s takaikkuna putosi ja 45 min polttoaine palaa täyttöputken suusta.

koe 2: 6 min 30 s tuulilasi rikki, matkustamo lieskahtaa, 13 min liekit takaikkunasta, 19 min 20 s auton takaosan palo kasvaa ja 20 min 30 s voimakas palo takaosassa.

koe 3: 5 min 50 s matkustamo lieskahtaa, 9 min 40 s takaikkuna rikki, 24 min 50 s liekkejä polttoaineen täyttöputkesta ja 32 min 50 s lammikkopalo auton takaosan alla.



Kuva 4.8. Kokeessa 3 mitatut kaasun lämpötilat. a) konepellin keskikohtan yläpuolella, b) oikean etuoven ikkunan yläpuolella, c) tuulilasin keskipisteen yläpuolella, d) lähellä vasemman etuoven ikkunaa, e) katon keskikohtan yläpuolella, f) takaikkunan oikean reunan yläpuolella, g) takaikkunan keskipisteen yläpuolella, h) takaikkunan vasemman reunan yläpuolella, i) moottoritulassa, j) takapenkin keskellä, k) tavaratilassa. Termoparien sijainti on kuvissa ilmoitettu pisteillä.



Kuva 4.8. (Jatkuu)

Taulukko 4.3. Kokeen 3 aikana tehdyt havainnot.

Aika (h:min:s)	Havainto
0:00:00	Sytytys moottorin alapuolelta
0:00:50	Sulaa, palavaa ainetta tippuu moottoritulasta
0:01:05	Oikea eturengas syttyy
0:02:20	Liekkejä jäähdyttäjistä
0:03:30	Savua matkustamossa
0:03:55	Halkeamia tuulilasissa
0:04:00	Liekkejä matkustamossa
0:04:40	Noin 1/3 tuulilasista putosi
0:05:10	Katto palaa matkustamossa
0:05:30	Liekkejä vasemman etuoven ikkuna-aukosta
0:05:50	Lieskahdus matkustamossa, vasemman etuoven ikkuna putosi, paljon savua
0:06:30	Hyvin paljon savua
0:07:20	Koko tuulilasi putosi
0:08:00	Palo moottoritulassa heikkenee, raju palo matkustamossa
0:09:40	Takaikkuna rikki
0:09:50	Oikean etuoven ikkuna putosi
0:10:00	Vasemman takaoven ikkuna putosi
0:11:30	Vasen eturengas syttyy, lammikkopalo moottorin alla
0:12:00	Palo moottoritulassa, palo matkustamossa heikkenee
0:13:00	Savua tavaratilasta
0:15:30	Palo moottoritulassa heikkenee
0:16:00	Palo tavaratilassa
0:17:00	Lammikkopalo moottorin alla on sammunut
0:19:10	Vasen takarengas syttyy
0:22:00	Palo matkustamossa on heikentynyt
0:24:35	Oikea takarengas syttyy
0:24:40	Auton koko takaosa palaa
0:24:50	Liekkejä polttoainesäiliöstä missä muovinen täyttöputki on sulanut
0:26:00	Palavaa muovia tai kumia auton takaosan alla
0:32:50	Lammikkopalo auton takaosan alla
0:36:30	Lammikkopalo on melkein sammunut, polttoaine palaa noin 3 m:n korkuisilla liekeillä oikean takalokasuojan alta
0:50:00	Polttoaine ja vararengas palaa, takarenkaat hehkuvat
1:44:00	Polttoaine on melkein palanut loppuun, vara- ja takarenkaat hehkuvat, pieniä liekkejä matkustamon lattialla
2:54:00	Hieman savua, hehkua ei näy

4.3 TEHDASPALOJA

4.3.1 Sähköisen vian aiheuttama hanatehtaan palo¹

Hanatehtaalla syttyi tulipalo sunnuntai-iltapäivänä 1.11.1992, jolloin paikkakunnan palokunta sai automaattihälytyksen. Palo, joka alkoi muovipinnoitusosaston uppokuumentimesta, tuhosi polypropeenista valmistettuja kemikaalialtaita sekä laitteita ja putkia aiheuttaen n.10 miljoonan mk:n vahingot. Laitoksen toiminta keskeytyi joidenkin viikkojen ajaksi.

Tapahutumien kulku

Aluehälytyskeskukseen tuli automaattinen palohälytys hanatehtaalta sunnuntaina 1.11.1992 klo 16.30. Hälytyksen antoi tällöin miehittämättömänä olleen tehtaan lämpöhälytinjärjestelmä. Palokunta oli paikalla 10 minuutissa. Tehtaan pintakäsittelyhallin kattoikkunat olivat rikkoutuneet niin, että kuumuus ja savu pääsivät purkautumaan niiden kautta ulos, mikä helpotti palokunnan sammutushyökkäystä. Vettä sekä sammutusvaahtoa ja -pulveria käyttäen palokunta sai tulen sammumaan tunnissa.

Aluksi polypropeenista valmistetun kemikaalialtaan reunaan kiinnitetyn 6 kW:n uppokuumentimen vaurioitunut liitäntäjohto oli sytyttänyt altaan reunan tuleen, joka levisi viereisiin altaisiin. Yhtä, huoltokäytävän toisella puolella sijaitsevaa tyhjää allasta lukuun ottamatta altaat sisälsivät hanojen pintakäsittelyssä käytettyjä kemikaaleja (mm. suola-, rikki- ja typpihappoa, nikkeli- ja kuparisulfaattia, boorihappoa sekä ammoniumhydroksidia) sisältäviä kylpyjä. Altaiden pituus oli 3 m, syvyys 1,4 m, leveys 0,4 ... 2 m ja seinämäpaksuus 12 mm sekä vetoisuus 1,7 ... 8 m³. Kuumuuden vaikutuksesta altaat sulivat kauimmaista kuparikylpyallasta lukuun ottamatta. Sen kylkeen oli tosin jo tullut kuumuuden vaikutuksesta ruskea läikkä. Sulaneissa altaissa olleet liuokset valuivat lattialle ja päätyivät alakerrassa sijainneeseen valuma-altaaseen. Kaikkiaan tuhoutui 22 allasta.

Lisäksi palossa tuhoutui n. 10 km PVC-kaapeleita (syöttökaapeleita, MMJ-johtoja ja telekaapeleita), 20 tasasuuntaajaa, n. 200 m 600 ja 800 mm:n läpimittaista PVC-ilmastointiputkea sekä allasosaston ympäröivästä tilasta erottaneet korrugoidusta PVC-muovista valmistetut väliseinät. Kiinteistö itse kärsi luonnollisesti myös vahinkoja: mm. kolme kattoa kannattanutta järeää rautapalkkia oli vaihdettava. Edelleen osaston päätietokone kärsi happamista höyryistä niin, että se oli korvattava uudella.

¹ Kirjoitus perustuu lehtiartikkeliin Helsingin Sanomissa 2.11.1992 sekä Matti Hirvensalon käyntiin palopaikalla 3.11.1992 ja sen aikana sekä myöhemmin yhtiön edustajilta ja viranomaisilta saatuihin suullisiin tietoihin.

Jälkitarkastelu

Palon aiheuttanut johto ja uppokuumennin, josta se lähti, tuhoutuivat palossa pahoin, mikä vaikeutti palonsyöntutkintaa. Tehtaalla oli kuitenkin ollut v. 1991 aivan vastaavanlainen palo, joka sattui työaikana ja joka saatiin välittömästi sammutettua. Sen jälkeen sähkökäyttöiset uppokuumentimet päätettiin korvata kuumavesiputkilla. Muutostyöt olivat jo niin pitkällä, että enää kolme kuumenninta oli vaihtamatta kohtalokkaan onnettomuuden sattuessa.

Palon syttymispaikasta n. 10 metrin päässä sijainnut lämpöhälytin siis laukesi palossa, mutta sen toiminta viivästyi siksi, että kuumuus pääsi suurelta osalta suoraan ulos särkyneiden kattoikkunoiden kautta. Savuilmaisimet olisivat toimineet nopeammin, mutta niiden käytöstä oli luovuttu niiden antamien lukuisten vikahälytysten johdosta. Ne reagoivat näet kylvyistä tuleviin höyryihin, eivätkä siten soveltuneet kyseiseen kohteeseen. Luonnollisesti tilojen varustaminen sprinklereillä olisi estänyt palon leviämisen.

4.3.2 Oikosulun aiheuttama kengänpohjatehtaan tehdashallin palo²

Kengänpohjatehtaan 6000 m²:n laajuinen tuotantohalli, jossa valmistettiin työ- ja turvakenkien pohjia polyuretaanista, paloi maan tasalle 18.10.1993 (Honkala 1983). Palosta aiheutui keskeytystappiot mukaanlukien n. 50 miljoonan mk:n vahingot. Varastoon oli juuri tuotu runsaasti raaka-aineita, jotka, samoin kuin valmiiden tuotteiden varasto, tuhoutuivat.

Palossa tuhoutui eri aineita seuraavasti: polyuretaanin raaka-aineita polyolia yli 50 000 kg ja metyleenidi-isosyanaattia 54 000 kg, muottien irrotusaineena käytettyä CFC:tä 14 000 kg, 1,1,1-trikloorietaania yli 6000 kg, asetonia 560 kg sekä tuhansia kiloja väriaineita, katalysaattoreita ja muita lisäaineita. Lisäksi paloi 85 000 kg kengänpohjamateriaalia (TR-kumia), 175 000 paria valmiita polyuretaanipohjia ja 12 000 paria valmiita TR-pohjia sekä 12 000 kpl pahvilaatikoita, joten jo pelkästään näiden materiaalien osalta palokuorma oli tavattoman suuri.

Tehdaskompleksi koostui kolmesta yhteenrakennetusta hallista, joiden yhteispinta-ala oli 6000 m². Rakennustyö oli toteutettu kolmessa eri vaiheessa käyttäen osastoinnissa B30- ja B60-ratkaisuja. I-hallin pohjoispäähän oli sijoitettu TR-kumipohjien valmistus, keskiosassa sijainneessa pajassa tapahtui kevytmetallivalumuottien valmistus, kun taas hallin eteläpäässä oli raaka-ainevarasto, raaka-aineiden esilämmitysosasto ja sosiaalitilat. II-hallissa, ns. PU-hallissa (polyuretaanihallissa) oli 6 kpl polyuretaanipohjavalukoneita ja sen eteläpäässä teknisiä huoltotiloja, mm. kompressorit. III-hallin pohjoispäässä oli pursauslinja ja pesulinja sekä keskiosassa kohdesuojattu kestomaalauslinja ja maalauskonelinja. Eteläpäässä sijaitsivat valmistuotevarastointi ja pakkaamo sekä viimeisenä toimistotilat. Halli oli suojattu lämpöilmaisimiin perustuvalla paloilmoitinjärjestelmällä.

Tehtaan 40 työntekijästä kolme oli työssä kyseisenä maanantai-iltana. He kuuluivat kovan paukahduksen hallin toiseen päähän. Pohjavalukone oli jo silloin sankan savun peitossa, ja sähköjohdot paloivat katossa. Kitkerä savu pakotti työntekijät ulos niin nopeasti, että palo-ovia jäi auki. Työntekijät hälyttivät palokunnan samaan aikaan kun myös automaattiset palohälyttimet laukesivat.

Tulipaloa sammutti seitsemän palokuntaa, kaikkiaan 60 miestä. Kolmesta hallista koostuva peltikuorinen tehdas tuhoutui sammuttajien ponnisteluista huolimatta kolmessa tunnissa.

² Kirjoitus perustuu lehtiartikkeliin Helsingin Sanomissa 20.10.1993 sekä palonsyyn-tutkintaraporttiin.

Sammutustyötä vaikeuttivat seuraavat tekijät:

- puutteellinen vedensaanti
- runsas savunmuodostus ja myrkylliset palamistuotteet
- kohteen laajuus sekä sinne varastoitujen aineiden ja koneiden sijoittelusta aiheutunut ahtaus
- sisätiloissa sattuneet sortumat ja räjähdykset
- normaalia suurempi palokuorma
- auki olevat palo-ovet
- viivästynyt jännitteiden poisto.

Palossa muodostuneet ja vapautuneet vaaralliset yhdisteet, fosgeeni ja isosyanaatit, aiheuttivat sen, että lähellä sijaitsevan talon asukkaat evakuoitiin ja muita lähiseudun asukkaita kehoitettiin pysymään sisällä, kunnes vaara oli ohi. Sammuttajille, joiden terveydelle palossa kehittyvät myrkylliset yhdisteet olivat erityinen uhka, tehtiin terveystarkastus heti seuraavana päivänä. Myös maaperänäytteitä otettiin, jotta olisi saatu selville se, kuinka paljon sammutusveden mukana oli imeytynyt maahan myrkyllisiä yhdisteitä.

Palonsyytutkinnassa selvisi lisäksi seuraavaa:

Tehdashallissa työssä olleiden havaintojen mukaan palo alkoi PU-hallin pohjoispäästä, PU-koneen nro 6:n väriainesäiliöiden ja koneen syöttöpäänyksikön välistä

Ennen palon havaitsemista hallissa työssä olleet työnjohtaja ja PU-konemies kuuluivat hallin perältä "posahduksen". Juostuaan paikalle työnjohtaja havaitsi tulen olevan irti lattiatasossa väriainesäiliön alla, syöttöpään yksikön alla ja samalla kohtaa kattopalkissa olevissa sähköjohdoissa sekä PU-koneen yhdessä istukassa.

Työnjohtaja aikoi yrittää palon sammuttamista koneen vieressä olleella jauhesammuttimella, mutta tuli ja sakea savu levisivät niin nopeasti, että ne estivät yrityksen.

Palonsyyntutkinta keskitettiin PU-koneeseen nro 6 sekä sen väriainesäiliöiden ja syöttöpäänyksikön väliselle osuudelle.

Tutkimuksissa kävi ilmi, että PU-koneen nro 6:n ympäristö oli likaisempi muihin koneisiin verrattuna. Tähän oli omat syynsä:

1. Kun muissa koneissa robotti ruiskutti valumuotteihin irrotusaineeksi silikonia, koneessa nro 6 tähän tarkoitukseen käytettiin CFC-vahayhdistelmää, jota myös ruiskutettiin korkeapaineruiskulla; tällöin ainetta levisi paikallispoistoimusta

huolimatta myös väriainesäiliöiden letkujen ja sähkökaapeleiden päälle sekä lähiympäristöön aina kattoa myöten.

2. Koneessa nro 6 oli omat väriainesäiliönsä: kolme sähkövastuksin ja sekoittimin varustettua tuplavärisäiliötä sekä yksi erillinen säiliö eli kaikkiaan seitsemän säiliötä, kun taas muissa tapauksissa väriaine sekoitettiin suoraan polyoliin.

Teknisessä tutkinnassa ja henkilökunnan haastatteluissa tuli ilmi myös muita merkittäviä seikkoja:

- väriainesäiliöt olivat pyörien päällä, ja niitä siirrettiin huollon ja täytön aikana, minkä vuoksi säiliöihin yhteydessä olevat kaapelit liikkuvat säiliöitä siirrettäessä
- väriainesäiliöiden kansitiivisteissä oli esiintynyt usein vuotoja ja tiivisteiden pettäessä väriainetta oli päässyt valumaan lattialle sähkökaapeleiden ja syöttöputkien päälle, mistä niitä oli vaikea saada poistetuksi
- tehtaalla käytettävien aineiden oli jo vuosien ajan todettu syövyttävän kumisia kaapeleita ja ilmaletkuja, ja näitä jouduttiin aika ajoin uusimaan
- kemikaaliroiskeet ja -höyryt olivat ilmeisesti haurastuttaneet yläpuolella sijainneiden loistelamppujen kiinnikkeitä, sillä lamppuja oli putoillut silloin tällöin
- valkoisen väriaineen säiliön sekoittajan virransyötössä oli hiljattain esiintynyt häiriöitä; sekoittajan rele meni ajoittain pois päältä, ja korjausajankohta oli jo sovittu
- suoraan palopaikan yläpuolella hallin peltikatto oli vuotanut jo pitkään, mutta sen korjaamiseen ei ollut ryhdytty.

Yllä esitettyjen seikkojen nojalla kaapelioikosulku näytti todennäköiseltä palon syytymissyylltä. Tutkinnassa selvisikin, että juuri sen väriainesäiliön, jonka sekoittajan releessä oli ollut häiriöitä, ja PU-kone nro 6:n syöttöpäänyksikön välisestä kaapelista löytyi oikosulkuun viittaavia sulamisjälkiä. Palonsyyntutkinta lopetettiin tähän.

Jälkitarkastelu

Yllä ilmenneiden selvien epäkohtien lisäksi suurena puutteena on pidettävä sitä, että kohde ei ollut sprinklattu; näin suuren palokuorman tapauksessa tilojen sprinklaus olisi ehdottoman välttämätöntä.

4.3.3 Salaman aiheuttama paloaseman palo

Rakennus

Kanadassa (Sandwich South Township, Windsor, Ottawa) salamanisku oli sytyttänyt tulipalon paloaseman radiohuoneeseen (Marinoff 1993).

Paloasema sijaitsee alueella, jonka keskimääräinen ukkospäivien lukumäärä on Kanadan suurin. Rakennuksen ympäristö on tasanko jonka korkein kohde on aseman radiotorni. Tämä on 24 m korkea ja noin 3 metrin etäisyydellä paloaseman hallirakennuksesta. Paloasema on miehitetty arkisin 8:00 - 17:00.

Asema on rakennettu tiilestä ja betonista. Rakennuksessa on paloautojen pysäköintitila, radiohuone, keittiö, pukuhuoneet, lepohuone, toimistohuoneita ja sähköhuone.

Radiohuoneessa oli radioasema, tietokone ja laminoidusta puusta tehty ohjauspöytä.

Radiotorni on pystytetty betonilaattaan ja sen huipussa on kaksi pystysuoraa taittodipoliantennia. Antennit oli kytketty radiohuoneen radioasemaan koaksiaalikaapelilla. Torni oli maadoitettu betonilaattaan.

Palotapahtuma ja seuraukset

Keskiyön aikaan 6.9.1990 alueella oli ukkosmyrsky ja salamointia. Sää oli lämmin ja tyypillinen tälle alueelle, jolla kesäisin on paljon ukkosmyrskyjä.

Seuraavana aamuna 6:30 havaittiin paloaseman radiohuoneessa lähes itsestään sammunut palo. Radiotornin osien tarkastuksessa havaittiin, että antennien koaksiaalikaapeliliitäntä oli vaurioitunut tornin yläosassa. Vahinko oli voinut syntyä vain salamaniskusta.

Salaman purkaus oli kulkenut koaksiaalikaapelin kautta radiohuoneen laitteisiin, joissa se sytytti tulipalon. Koaksiaalikaapeli ja antennit oli eristetty radiotornista.

Palo rajoittui radiohuoneeseen eikä muualla rakennuksessa ollut palovaurioita. Palo oli sammunut itsestään sen jälkeen, kun huoneessa ollut materiaali oli palanut loppuun.

Radiohuone oli rakennettu paloaseman hallissa kahdesta muuratusta seinästä ja kahdesta teräsrunkoisesta levyseinästä. Huoneessa oli teräksinen katto, puinen ovi ja useampi lankalasi-ikkuna. Ikkunat olivat ehjät palon jälkeen.

Huoneen katossa olleet vesijohtoputket olivat liian kuumat koskettavaksi vielä viisi tuntia palon jälkeen. Radiolaitteistosta oli ainoastaan metallinen kotelo jäljellä, kaikki sisäiset komponentit olivat hävinneet palossa. Tämä osoittaa, että palo on kestänyt huoneessa pitkään ja kuumuus on ollut kova.

Huoneen rakenne esti palon leviämisen rakennuksen muihin osiin, mikä helpotti suuresti palonsyyn selvittämistä.

Keskustelua

Tutkimuksissa todettiin, että radiotornissa ei ollut ukkosenjohdatinta. Torni itse oli maadoitettu. Koska antennissa ei ollut maajohtoa, se toimi ukkosenjohtimena kun salama osui siihen ja kun virta kulki koaksiaalikaapelin ja radiolaitteiston kautta eteenpäin.

Koaksiaalikaapeli ja liittimet olivat mitoitettut 1 kW:n käyttöteholle. Koska paloaseman radioaseman nimellisteho oli selvästi pienempi, alle 100 W, oli epätodennäköistä, että havaitut koaksiaalikaapelivauriot voisivat aiheutua radiolähtetimen viasta.

Koska radiolaitteiston komponentit olivat hävinneet tulipalossa, ei voitu selvittää mikä kohta radiohuoneessa oli syttynyt ensiksi.

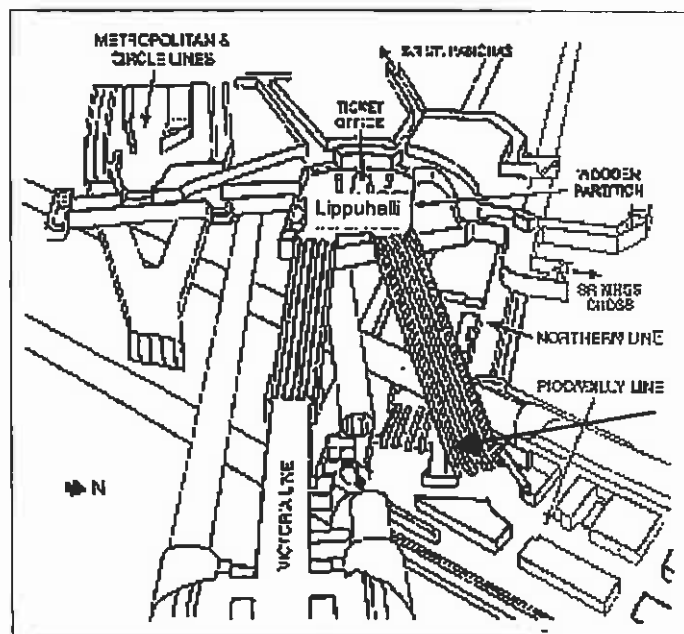
Tässä tapauksessa salaman kulkema reitti oli selvä. Salama saattaa kuitenkin kulkea monimutkaisesti, ja purkauksen kulku iskukohtasta tulipalon syttymiskohtaan voi olla kaikkea muuta kuin selvä.

4.4 MUITA SUURIA TULIPALOJA

4.4.1 King's Crossin metroaseman palo

King's Crossin metroasemalla Lontoossa 18.11.1987 puisissa liukuportaissa syttynyt palo levisi nopeasti ja aiheutti 31 henkilön kuoleman sitä seuranneessa tulipalossa portaiden yläpään lipunmyyntihallissa, (kuva 4.9). Kello 19:29 matkustaja huomasi Piccadilly-linjan liukuportaassa 4 palon portaiden alemmassa kolmanneksessa (syttymiskohta osoitettu nuolella kuvassa 4.9). Kello 19:30 toinen portaita 4 käyttänyt matkustaja painoi pysäytysnappia ja käski huutaen tämän portaan muita matkustajia poistumaan siltä (Crossland 1992). King's Crossin metroasema on Lontoon metron vilkkain, jonka kautta vuonna 1987 kulki keskimäärin 250 000 henkeä päivittäin.

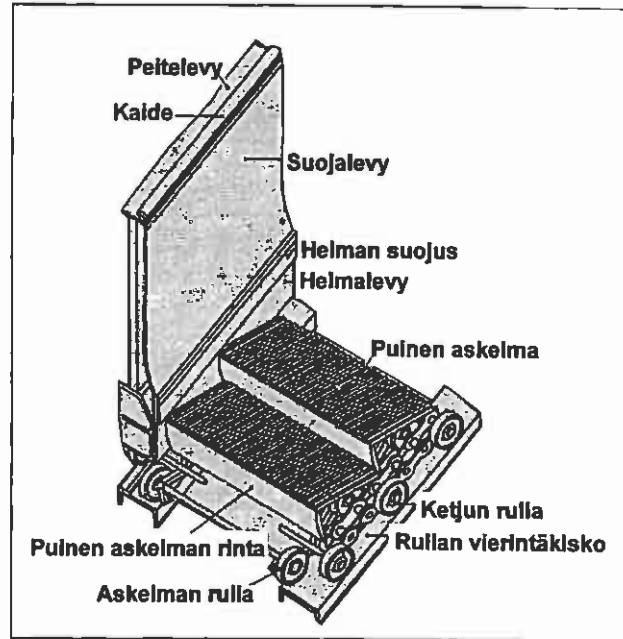
Onnettomuustutkintalautakunnan tuloksille on omistettu koko Fire Safety Journal-lehden numero 1 vuosikerrassa 18 vuonna 1992. Tutkinta tehtiin erityisen huolellisesti, mutta sitä vaivasi alkuvaiheissa selvän palonsyyn puuttuminen: Miksi alussa vaatimattomalta näyttänyt palo liukuportaissa riehaantui äkkiä tuhoisaksi tulisuihkuksi, joka puhalsi suurella voimalla liukuportaiden kuilusta yläpuoliseen lipunmyyntihalliin? Kun monenlaisista materiaaliepäilyistä ei saatu luotettavaa selitystä havaitulle, ongelma ratkesi aivan yllättäen numeerisella simuloinnilla. Tässä keskitytään selostamaan numeerisen simuloinnin käyttöä sekä sillä saatujen tulosten kokeellista varmentamista.



Kuva 4.9. Kolmiulotteinen kuva King's Crossin metroasemasta (Crossland 1992).

Kuvassa 4.10 liukuportaan rakenne on esitetty yksityiskohtaisesti. Liukuporras oli periaatteeltaan Yhdysvalloissa viime vuosisadan lopulla kehitettyä tyyppiä. Sellainen otettiin Lontoon metrossa käyttöön vuonna 1911 ja tämä porras oli asennettu vuonna 1939. Portaan askelmat olivat puuta ja myös kaiderakennelman

osat sekä seinien mainostaulut olivat puuta. Liukuportaiden alle kertyi rasvaa kiskojen voitelusta sekä kaikenlaista pölyä ja roskaa, koska niitä ei kyetty puhdistamaan kunnolla riittävän usein. Palon jälkeen arvioitiin, että kunkin portaan alla oli 250 kg palavaa voiteluaineiden jätettä ja roskaa.



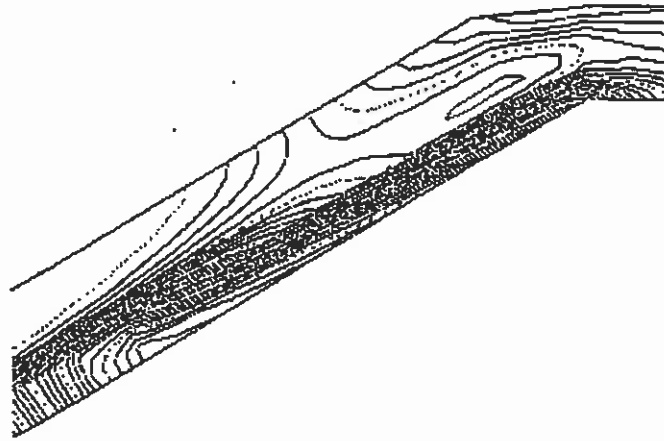
Kuva 4.10. Kolmiulotteinen kuva liukuportaan rakenteesta (Crossland 1992).

Etsittäessä syytä, miksi palo kehittyi niin tuhoisaksi, tilannetta simuloitiin AEA Technologyn kehittämällä kenttämallilla HARWELL-FLOW3D. Sitä on käytetty yleisenä virtauslaskentaohjelmistona erilaisten virtausmekaniikan ohjelmien laskemiseen sekä joihinkin tulipalojen simulointeihin tätä tapausta ennen (Simcox ym. 1992). Paloa käsiteltiin ajasta riippuvana lämmönlähteenä, joka sijoitettiin silminnäkijän kertomaan kohtaan kuilua. Laskentahila koostui 49 x 32 x 12 kopista, jotka asetettiin reunoiltaan mukailemaan metroaseman asianosaisia pintoja. CRAY-2 koneella ajasta riippumattoman ongelman ratkaisuun tarvittiin 10 min keskusyksikköaika. Ajasta riippuva laskenta vaatii paljon pitempiä laskenta-aikoja, pahimmillaan 48 h. Verkkoa jonkin verran tihentämällä aikaa voitiin lyhentää 1,5 tuntiin. Kaikkiaan 13 erilaista tilannetta simuloitiin.

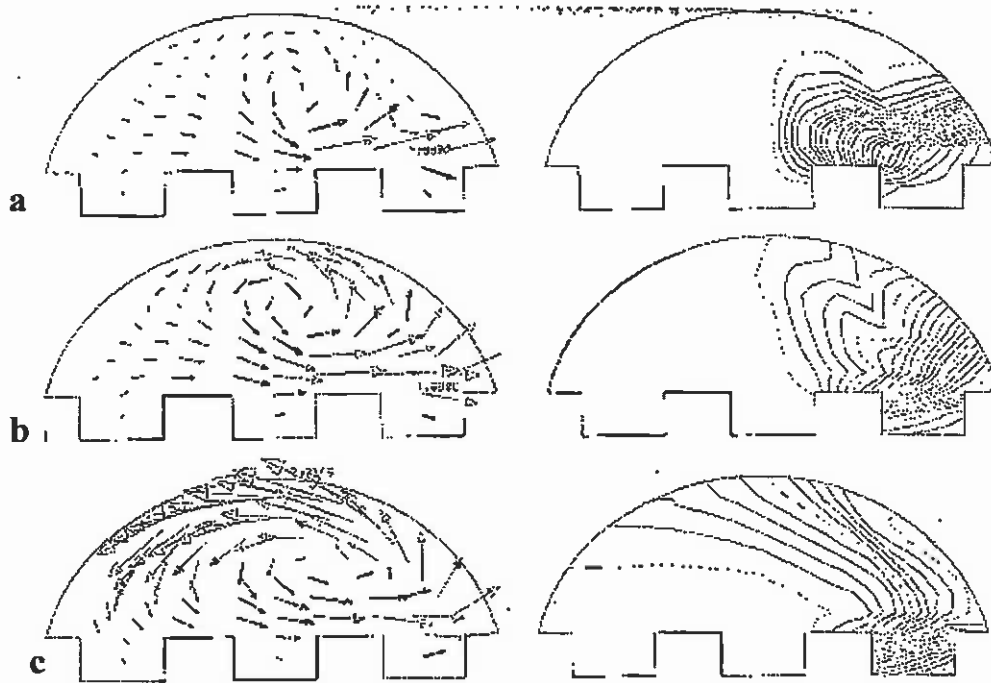
Yllättävintä tuloksissa oli lämmönlähteestä nousevan palopatsaan painuminen porraskuiluun (kuva 4.11). Kuumien kaasujen kuilulla aiheuttama veto sai aikaan ylöspäin suuntautuvan virtauksen (muutamia metrejä sekunnissa), joka jo taivutti palopatsasta huomattavasti kohti portaan askelmia. Tämä taipuminen yhdistettynä Coanda-ilmiön vaikutukseen, jossa patsaaseen tulee lisäilmaa vain toiselta puolelta, painoi palopatsaan aivan kiinni askelmien tasolle, kuten kuvasta 4.11 ilmenee. Kaasun lämpötila ja lämpötilagradientti ovat suurimmat portaiden askelmien lähellä, jossa 20 K välein piirrettyjä isotermejä on hyvin tiheässä.

Kuvasta 4.12, jossa on sekä nopeusvektorit kolmessa eri kuilun poikkileikkauksessa että isotermit 20 K välein, havaitaan korkeiden lämpötilojen painuneen oikeanpuoleiseen liukuportaan uomaan. Kun lähes koko vapautunut

energia keskittyy uomaan, ja liekit painautuvat pitkin portaan askelmia, palon leviäminen kiihtyy huomattavasti verrattuna tilanteeseen, missä liekit kohoaisivat pystysuoraan palavasta pinnasta. Tällä selittyi tulipalossa havaittu kuilun käyttäytyminen puhalluslampun tavoin.



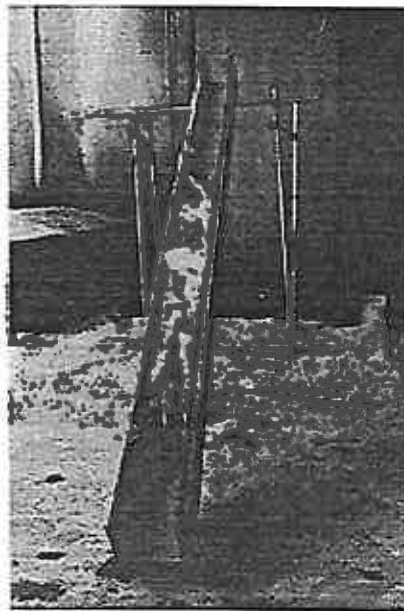
Kuva 4.11. Simuloitu lämpötilakenttä liukuportaan nro 4 kuilussa. Isothermit on piirretty 20 K välein. Huomaa jyrkkä lämpötilan muutos aivan lähellä portaiden tasoa, jonne liekit ovat painautuneet (Simcox ym. 1992).



Kuva 4.12. Virtauksen nopeusvektorit (vasemmalla) ja isotermit 20 K välein (oikealla) liukuportaan kuilun pystyleikkauksissa ylhäältä alas päin katsottaessa. a) Leikkaus syttymiskohdassa portaiden alapäässä, b) jonkin verran ylempänä ja c) lähellä portaiden yläpäätä (Simcox ym. 1992).

Koska simuloinnin ennustamaa ilmiötä ei tunnettu aiemmin, tulokset varmistettiin tekemällä kokeita porraskäytävän pienoismalleilla, jotka oli skaalattu 1:3 ja 1:10 (Moodie ja Jagger 1992) sekä tutkimalla havaittua uomailmiötä perusteellisesti mittakaavassa 1:10 tehdyllä pienoismallilla (Drysdale ym. 1992). Kuvassa 4.13 on esitetty 1:10 skaalatulla mallilla tehty koe, mistä näkyy selvästi liekkien painautuminen kuilun uomaan (Moodie ja Jagger 1992). Näillä kokeilla pystyttiin todentamaan simuloinnin ennustama ilmiö sekä voitiin kuvata sen esiintymisen ehdot. Uomailmiö on mahdollinen, jos kuilun kaltevuus ylittää 30° vaakatasoon nähden. Uomailmiön löytyminen simuloimalla on ilmeisesti palotekniikassa ensimmäinen kerta, kun aivan uusi ilmiö on kyetty ennustamaan teoreettisesti ja sitten havaittu vasta kokeellisesti.

Uuden ilmiön lisäksi virtauslaskentasimuloinnilla pystyttiin selvittämään liukuportaiden palon useita yksityiskohtia ja tulkitsemaan havaittuja ilmiöitä kvantitatiivisesti siten, että kaikki olennaiset tapahtumien traagiseen kulkuun vaikuttaneet päätekijät voitiin tunnistaa sekä myös ennustaa kvantitatiivisesti sillä tarkkuudella kun niistä oli silminnäkijähavaintoja. Tämä tapaus osoittaa fysiikan perustutkimuksesta ja tähtitieteestä moneen kertaan havaitun ilmiön, että hyvä teoria on tarkempi kuin kokeelliset, käytettävissä olevat havainnot. Teoreettisten laskelmien jälkeen on osattu etsiä uutta ilmiötä oikeasta paikasta, kuten tähtitieteen häiriölaskennalla saatuja uloimpien planeettojen asemaa, joita ei ollut aiemmin kaukoputkilla onnistuttu havaitsemaan. Tämä esimerkki osoittaa tehokkaan simuloinnin voimaa palonsyyn selvittämisessä.



Kuva 4.13. Uomailmiö 100 mm x 100 mm pienoismallikokeessa (Moodie ja Jagger 1992).

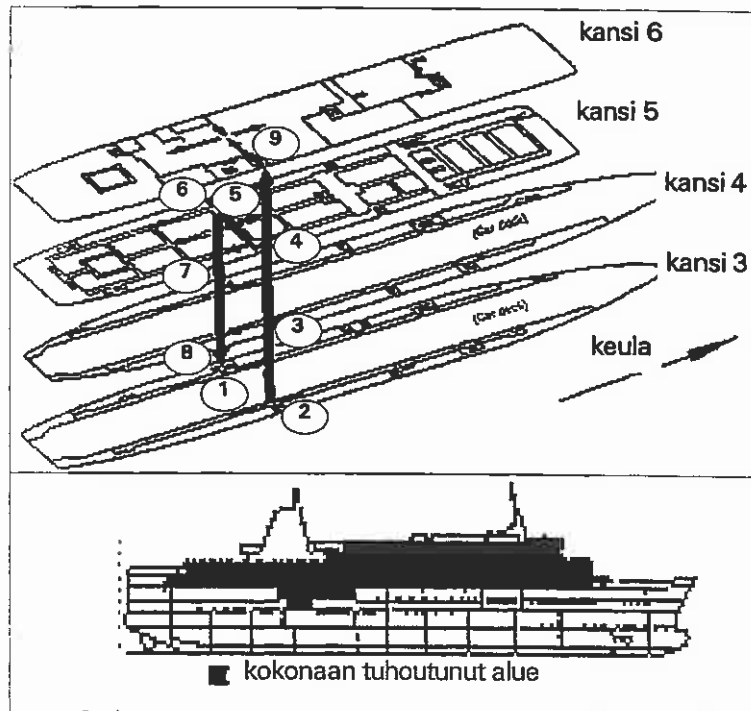
4.4.2 Scandinavian Star -laivan palo

Scandinavian Star-laivan palo Oslo - Fredrikshavn reitillä Skagerrakin salmessa lauantaina 7.4.1990 on merenkulun historian pahin tulipalo viime vuosina (NOU 1991:1A, NOU 1991:1B), sillä siinä menetti henkensä 158 ihmistä todennäköisesti viimeistään puolen tunnin sisällä palon alkamisesta. Laivassa oli Oslosta lähdettäessä perjantaina 6.4. klo 21:45 matkustajina 383 ja miehistönä 99 henkeä. Kannella 4 havaittiin lauantaiyönä 7.4. klo 1:45 ... 2:00 vuodevaatekasaan sytytetty tulipalo, joka sammutettiin. Hiukan klo 2 jälkeen havaittiin kannella 3 perässä käytävällä uusi ilmeisesti paljaalla liekillä sytytetty palo, joka kehittyi muutamassa minuutissa siten, että liekit ja myrkyllinen savu levisivät hytteihin kansille 4 ja 5 sekä laivan yläosiin. Laiva lähetti hätäsanoman klo 2:24. Klo 3:20 kapteeni päätti hylätä laivan ja miehistö poistui siltä. Laiva hinattiin Lysekilin satamaan Ruotsiin ja sammutettiin lopullisesti sunnuntaina 8.4. klo 16.

Tahallisesti sytytetty palo sai laivassa katastrofin mitat tutkijalautakunnan mukaan pääasiassa erilaisten inhimillisten virheiden vuoksi siksi, että laivan omistajat ja päällystö sallivat sen lähteä merelle, vaikka henkilöstön ja miehistön turvallisuudessa sekä miehistön työskentelyolosuhteissa oli vakavia puutteita. Pahimpia niistä oli muutama päivä aiemmin rekrytoidun miehistön kielivaikkeudet (portugali) ymmärtää laivan komentokieliä (englanti, norja). Myös miehistön palontorjuntakoulutuksessa oli kaikilla tasoilla vakavia puutteita. Lisäksi laivalla havaittiin eriasteisia teknisiä puutteita, vaikka ne tässä onnettomuudessa eivät olleetkaan tragedian varsinaisia aiheuttajia.

Kuolinsyynä oli 125:llä 158 vainajasta hiilimonoksidimyrkytys (CO), vaikka huomattavalla osalla oli veressä myös runsaasti syaanivetyä (HCN). Muutamilla henkilöillä syaanivetymyrkytys on ollut kuoleman ensisijainen aiheuttaja. Vain 10 henkilöä oli kuollut suoraan lämpövaikutuksista ilman selviä myrkytysoireita. Muilla (alle 20:lla) kuolinsyyt olivat muita, mutta kenelläkään kuoleman syynä ei ollut sairaus, fyysinen vamma tai liiallinen alkoholin käyttö. Henkilöistä 99 oli kuollut hytteihinsä, yli 50 löydettiin kannen 5 peräosan käytäviltä.

Onnettomuudesta tehtiin laaja ja perusteellinen selvitys, johon sisältyi tavanomaisen komiteatyöskentelyn lisäksi sekä erilaisia kokeita ja rekonstruktioita että tulipalon numeerista simulointia sen hetken parhaimmilla kenttämalli-ohjelmistoilla. Paksut tutkimusraportit (NOU 1991:1A, NOU 1991:1B) ovat tällaisen tutkimuksen käsikirjoja. Kun tutkimuksissa oli voitu paikantaa syttymiskohta, SINTEFin laboratorioissa Trondheimissa Norjassa tehtiin seitsemän täysmittaista koetta palon kehittymisen kulun varmistamiseksi (Meland ja Lønnvik 1990).

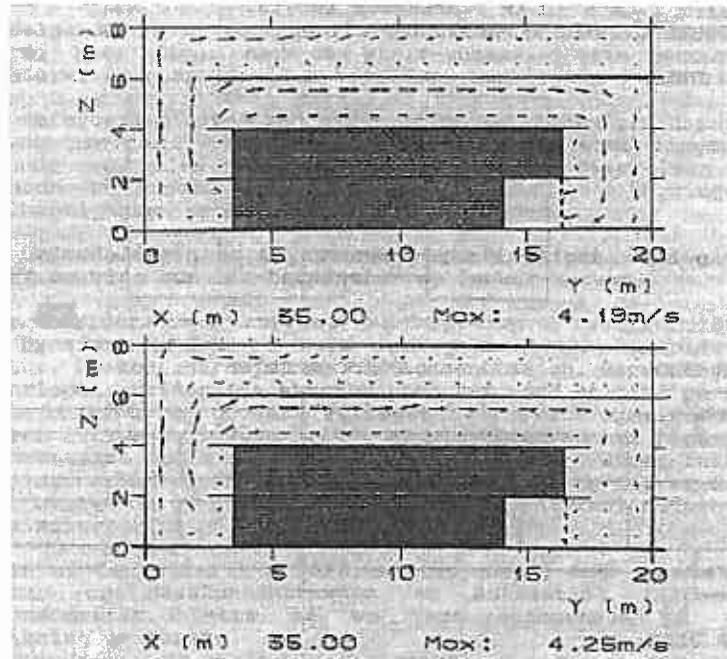


Kuva 4.14. a) Palon leviäminen laivalla (numeroiden selitys tekstissä), b) lopulta tuhoutunut alue.

Palon kehittyminen laivalla selviää kuvasta 4.14. Numeroilla merkittyjen paikkojen merkitys on seuraava kuvassa (a): (1) Palo syttyi täällä hiukan klo 2:00:n jälkeen. Arvioiden mukaan 2 ... 8 minuutissa se saavutti 200 kW:n tehon. Tätä pidetään katastrofipalon alkuhetkenä. (2) Palo levisi nopeasti tähän portaikkoon ja sitä ylöspäin. (3) Savu ulottuu kannelle 4 noin 1 min syttymisen jälkeen ja leviää portaikosta käytävää pitkin sekä keula- että peräosaan. (4) Savua tulee kannelle 5 noin 2 ... 3 min:n kuluttua, ja se alkaa tunkeutua ympäröiviin käytäviin. (5) Palo leviää tässä käytävässä laivan oikealta vasemmalle puolelle. (6) Vasemmalla puolella palo lähtee leviämään alas pitkin portaikkoa. (7) Kannella 4 savu leviää vasempaan käytävään, mutta heikommin kuin kannella 5. Kaikki matkustajat voitiin evakuoida tältä alueelta. (8) Palo leviää kannelle 3, jossa palo-ovi autokannelle on auki. (9) Palo leviää kannen 6 ravintolaosaan portaikon yläpään avoimesta palo-ovesta.

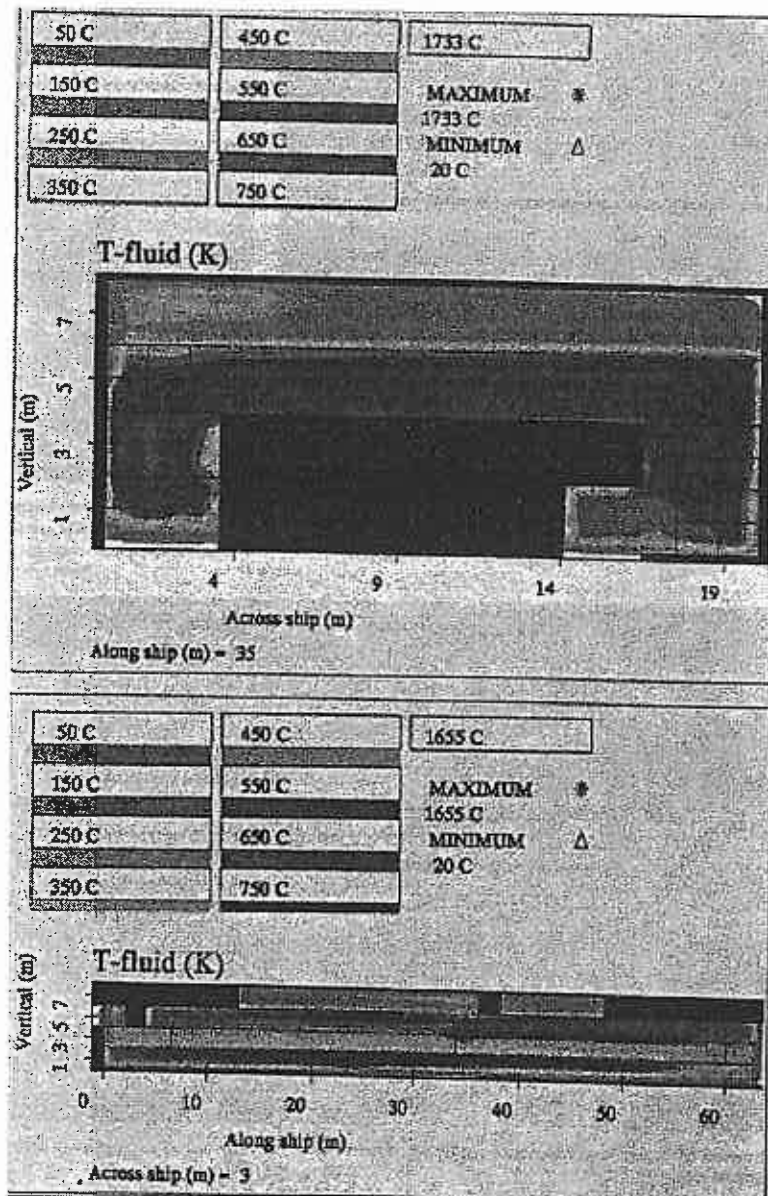
Numeerisella palon simuloinnilla käyttäen kenttämallia KAMELEON II Wighus ja Fagertun (1990) laskivat palon kehittymisen sen jälkeen, kun paloteho oli ylittänyt 200 kW. Tämän laskennan perusteella käyttäen syötetietoina täysmittaisista laboratorikokeista (Meland ja Lønnvik 1990) saatuja mittaustuloksia Wighus ja Fagertun laskivat kriittisten tilanteiden syntymisen laivan eri käytävissä. Kuvassa 4.15 on esitetty kaasuvirtausten nopeuskenttä poikkikäytävässä 6 min:n kuluttua palon ylitettyä kriittisen 200 kW:n tehon. Ylemmässä osassa käytävään johtava palo-ovi on auki, alemmassa kiinni. Kuvasta 4.15 nähdään, että ilmastointi edistää palon leviämistä voimakkaasti vasemmalta oikealle sekä alas oikeaa käytävää. Tästä selviää, ettei paloa tarvinnut syyttää erikseen eri käytävissä, vaan se oli luonnollinen palon kehittymisen seuraus. Kuvassa 4.16 on esitetty lämpötilakenttä poikkikäytävän kohdalla myös 6 min:n

kuluttua. Siitä näkyy, että lieskahduslämpötila on ylitetty käytännöllisesti katsoen koko kuvatulla alueella. Myrkyllisten kaasujen tuoton laskennasta ilmenee, että kansilla 3 - 5 kriittinen annos ylitetään 7 ... 9 min:n sisällä siitä, kun paloteho on ylittänyt 200 kW. Lämpötilat ylittävät 200 °C saman ajanjakson sisällä.



Kuva 4.15. Lasketut virtausnopeudet laivan poikkileikkauksessa porraskäytävien kohdalla (Wighus ja Fagertun 1990).

Tässä tutkinnassa simuloinnilla voitiin luoda palon ajallisesta kehitymisestä tarkka kuva koko laivan alueella käyttäen hyväksi syttymiskohtaan porraskäytävän osalla tehdyistä täysmittaisista kokeista mitattuja tietoja. Palokokeiden tekeminen täysmittaisesti todellisessa laivassa olisi huomattavan vaikeaa ja taloudellisesti erittäin kallista. Siten simulointi antaa kätevän ja taloudellisen tavan laajentaa kokeista saatuja tuloksia ennustamaan koko laivan tilojen käyttäytymistä ja kriittisten olosuhteiden syntymistä palon aikana.



Kuva 4.16. Lasketut lämpötilat laivassa. Ylempi kuva: poikkileikkauksessa porraskäytävien kohdalla (35 m). Alempi kuva: vasemmassa käytävässä laivan pituussuunnassa (3 m), (Wighus ja Fagertun 1990).

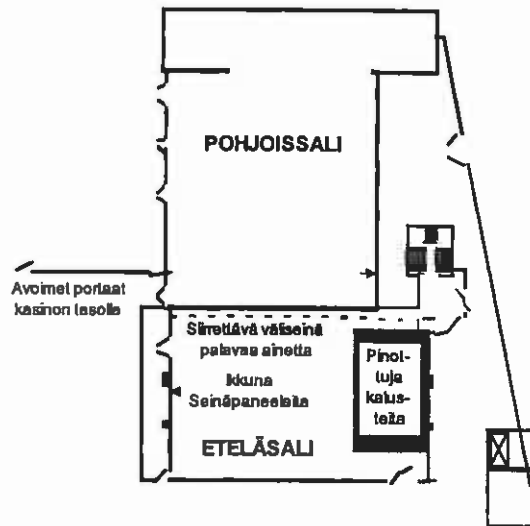
Tässäkin tapauksessa kuten edellisessä King's Crossin palon selvittämisessäkin kenttämallisimuloinnilla päästiin sellaisiin kvantitatiivisiin tuloksiin, joita ei aiemmin käytettävissä olevin menetelmin olisi ollut mahdollista saada. Asiantuntija-arvioiden (=mielipiteiden) tilalle voidaan esittää selviä kvantitatiivisia ennusteita, joita voidaan verrata silminnäkijän tai palon rakenteisiin jättämiin jälkiin. Palon numeerinen simulointi antaa palonsyyn selvittämiseen kokonaan uuden voimallisen työkalun.

4.4.3 Dupont Plaza Hotel and Casino

Puerto Ricon San Juanissa syttyi tulipalo 31.12.1986 klo 15:22 Dupont Plaza Hotel and Casino -rakennuksessa. Palon seurauksena kuoli 98 ja loukkaantui yli 140 henkilöä. Hotelli oli rakennettu 1960-luvun alussa, se oli sprinklaamaton ja siihen liittyi 20-kerroksinen asuintorni. Hotellissa ei ollut minkäänlaista paloilmoitusjärjestelmää. Myöskään torniin asennettu, käsikäyttöinen kuulutusjärjestelmä ei ilmeisesti toiminut palon alkaessa. Palo oli Yhdysvaltain pahimpia hotellipaloja tällä vuosisadalla (Klem 1987).

Useat Yhdysvaltain liittovaltion elimet olivat tutkimassa paloa. Silloisen National Bureau of Standards'in Center for Fire Research vastasi palon kehittymisen mallittamisesta käyttäen yksinkertaisia insinööriökaluja. Tässä raportoidaan tämän analyysin tulosten pääkohtia, sillä menettely oli ensimmäisiä palon kehittymisen teoriaa hyödyntäviä huonepalon rekonstruktioita, joita on raportoitu julkisesti (Nelson 1987).

Kuvassa 4.17 on piirretty hotellikompleksin pohjapiirroksista osia, jotka olivat olennaisia tässä esitetyille palotapahtumille. Palo oli sytytetty tahallaan ja se alkoi suuresta Eteläsaliin pinotusta huonekalukasasta. Nämä vierashuoneiden kalusteet oli toimitettu äskettäin ja varastoitu tilapäisesti saliin. Kalusteet olivat vielä kuljetuspakkauksissaan ja ne oli kasattu 5,5 m x 9,4 m alueelle 1,8 m korkeisiin pinoihin. Syttyttyään palo levisi minuuteissa koko kalustekasaan ja Eteläsaliin muihinkin palaviin materiaaleihin kuten seiniin, mattoihin, tuolipinoihin sekä palavasta materiaalista tehtyyn Etelä- ja Pohjoissalien väliseen avattavaan väliseinään. Samoihin aikoihin kun Eteläsali lieskahti, palo pääsi myös väliseinän läpi Pohjoissaliin. Eteläsaliin ikkunoiden rikkouduttua pian tämän jälkeen palokaasut pääsivät niiden kautta leviämään ympäröiviin tiloihin (Klem 1987). Tässä kuvataan, miten palon eteneminen syttymiskohdasta Pohjoissaliin lieskahtamiseen saakka voitiin arvioida mallittamalla.

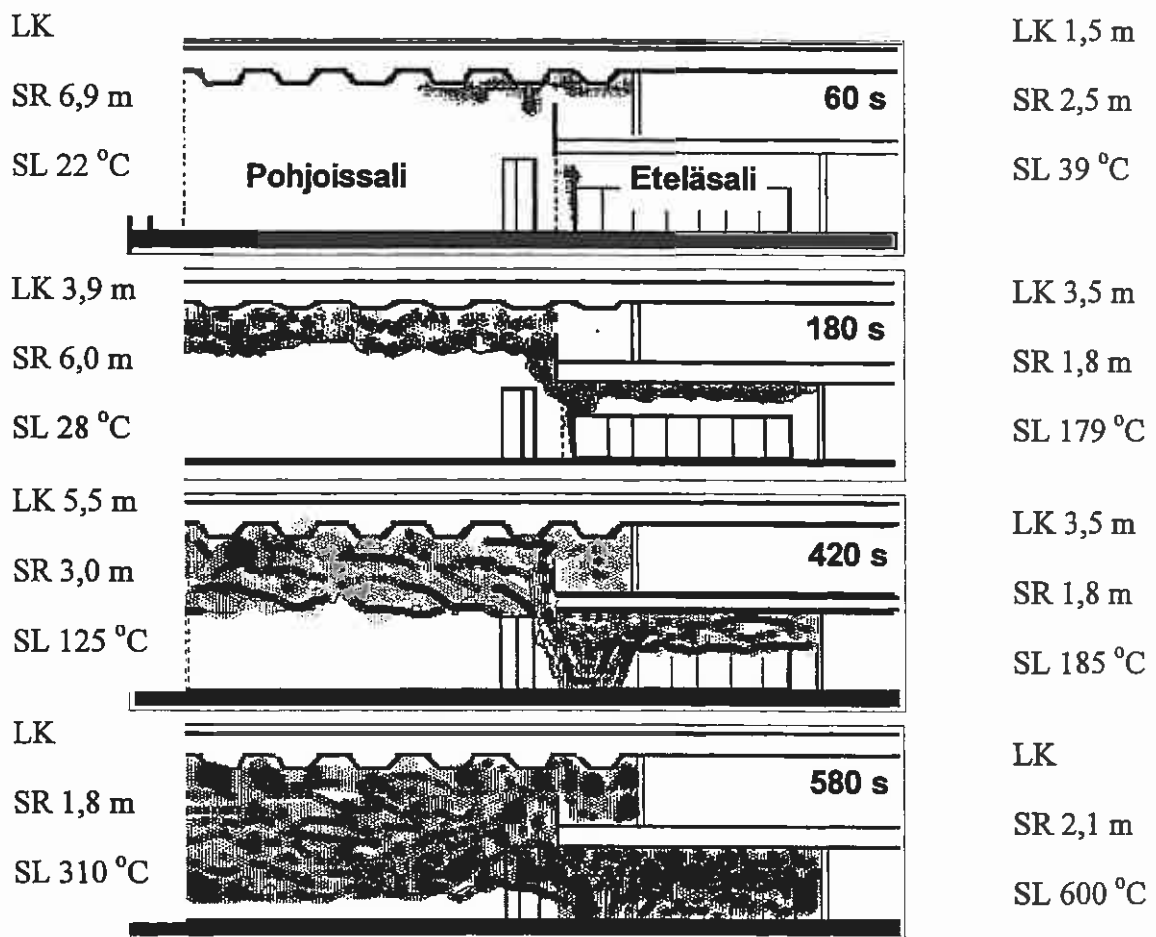


Kuva 4.17. Hotellin pohjakerros (osittain) (Nelson 1987).

Vyöhykemalliohjelmaa FIRST käytettiin palon simuloimiseen hotellin Pohjois- ja Eteläsaleista koostuvassa osassa. Paloteho määriteltiin käyttäen ajan neliöön verrannollista kasvukäyrää NFPA 204M:n määrittämällä tavalla. Neljästä mahdollisesta tämän standardin käyrästä nopea kasvu vastasi laboratorio-mittausten perusteella 1,8 m korkuisen kalustepinon paloa. Tulokset on esitetty graafisesti kuvassa 4.18. Siinä rakennuksen alimmat kerrokset on esitetty pystyleikkauksena katsoen vasemmalta kuvan 4.17 pohjapiirroksessa.

Palon vaiheet on esitetty neljänä eri ajanhetkenä, jotka on osoitettu kunkin kuvan oikeassa yläkulmassa. Kummallakin puolella kuvaa on taulukot, jotka osoittavat vyöhykemallilla laskettuja olosuhteita Pohjois- ja Eteläsalissa. Lyhenteiden merkitys: LK lieskan korkeus, SR savurajan korkeus lattiasta, SL savun lämpötila, NÄ näkyvyys savussa ja HA happipitoisuus tilavuusprosentteina.

Nelson ei esitä raportissaan yksityiskohtaisia vertailuja silminnäkijöiden havaintojen kanssa, koska tämä vertailu lienee tehty muussa yhteydessä osana poliisitutkintaa. Hänen suullisten mainintojen perusteella yhteensopivuus oli kuitenkin hyvä, ja tämä analyysi auttoi ymmärtämään palon kulkua ja sen aikana sattuneita ilmiöitä huomattavasti paremmin kuin todistajien kertomukset yksistään.



Kuva 4.18 Huonepalon kehittyminen hotellissa rekonstruktiosimuloinnin perusteella Nelsonin (1987) mukaan. Kummallakin puolen taulukot Pohjois- ja Eteläsaliin olosuhteista vyöhykemallisimuloinnin perusteella. Lyhenteiden selitys tekstissä.

4.4.4 Syttymishetken määrittäminen

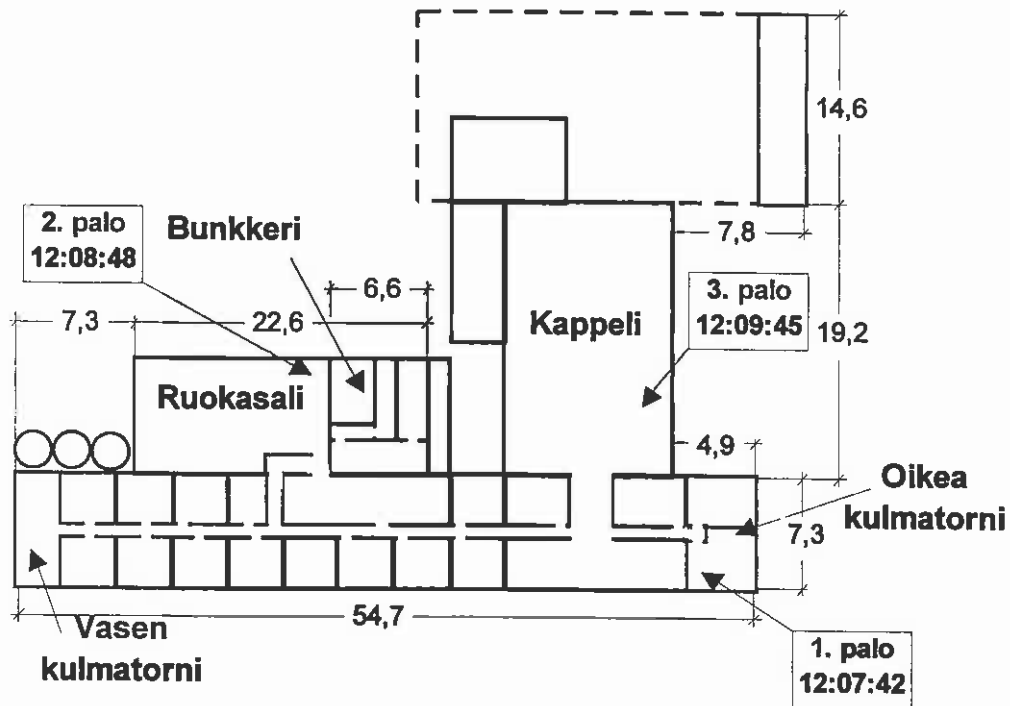
Kommuunin piirittäminen Wacon lähellä, Texasissa 19.4.1993 johti tulipaloon, joka vaati 47 ihmisen hengen paloon menehtyneinä. Sen lisäksi piiritettyjä kuoli muissa olosuhteissa siten, että kommuunista löydettiin kaikkiaan 77 henkeä kuolleena (Tremblay 1994). Koska tapahtuma oli laajalti julkisuudessa, niissä esitettiin myös useita teorioita palon syttymisyydestä ja aiheuttajaosapuolesta. Professori James G. Quintiere, University of Maryland, College Park antoi lausunnon palonsyyn tutkimisesta 26.7. 1995 Yhdysvaltain liittovaltion kahden alakomitean edessä, (Quintiere 1995). Tämän lausunnon mukaan palon syntyminen voitiin ajoittaa tarkasti, syttymiskohdat paikantaa ja sytyttäjätaho

tunnistaa. Tuloksen saamiseen jouduttiin käyttämään palonsyyn selvityksessä harvinaisia keinoja, joita tässä selostetaan Quintieren (1995) raportin perusteella.

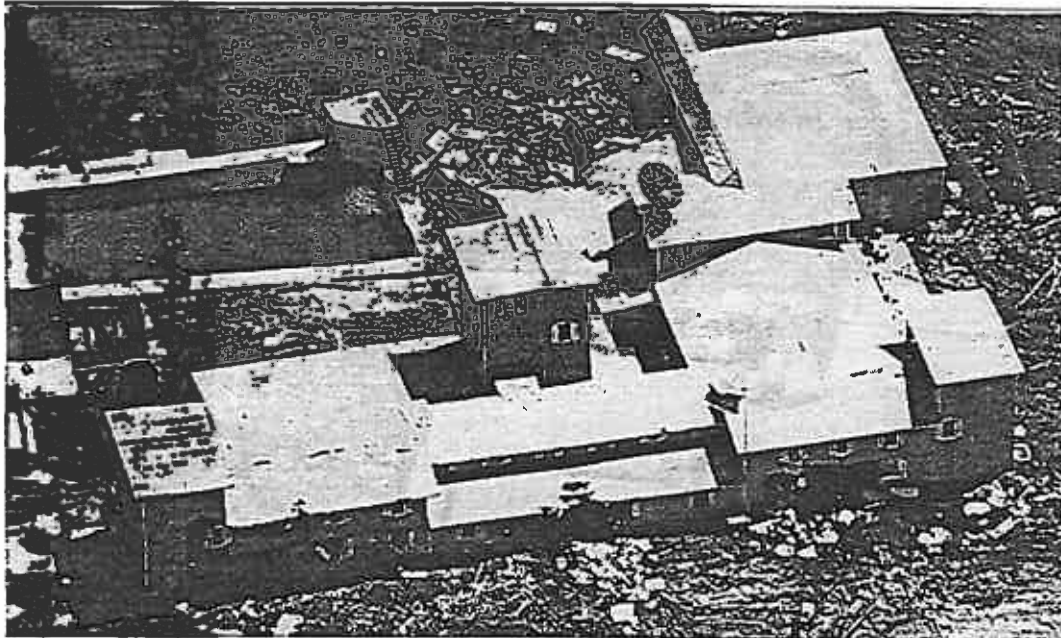
Kuvassa 4.19 on kommuunirakennuksen pohjapiirros ja kuvassa 4.20 ilmavalokuva rakennuksesta hieman ennen paloa (Quintiere ja Mowrer 1993). Ilmakuvassa katsotaan rakennusta pohjapiirroksen kuvan 4.19 etuvasemmalta.

Tapahtumista otettiin kuvia uutisvälineiden videokameroilla ja tavallisilla kameroilla sekä FBI:n infrapunakameralla. Tämä kamera oli ratkaiseva palotapahtumien selvittämisessä. Sen kellon näyttämä tallentui sekunnin tarkkuudella kuvaruutuun. Kello oli kalibroitu viralliseen aikaan kuvauspäivänä. Muissa kameroissa olevia kelloja ei oltu kalibroitu, ja niiden näyttämät poikkesivat merkittävästi infrapunakameran kellon ajoista (toinen videokameroista oli jäljessä 19 s vielä 1 h aikavyöhykekorjauksen jälkeen). Kuitenkin tekemällä filmeistä kooste jaetulle kuvaruudulle ja vertaamalla kuvien yksityiskohtia, kaikkien kameroiden kuvat voitiin asettaa yhteiselle aika-asteikolle. Näin niiden antama informaatio voitiin asettaa täydentämään toisiaan. Kameroilla otetut valokuvat voitiin ajoittaa useimmiten 30 s tarkkuudella videokuviin verraten (Quintiere ja Mowrer 1993).

FBI:n käyttämä infrapunakameran kadmiumtelluridikide toimi aallonpituus-alueella 8 ... 12 μm . Sen harmaa-asteikko kattoi 44 °C alueen, jonka keskikohta asettui automaattisesti kuva-alueen keskilämpötilan mukaisesti. Jos keskilämpötila olisi ollut 30 °C, kameran harmaa-asteikko olisi näyttänyt täysin mustaa 8 °C kohdalla ja täysin valkoista 52 °C kohdalla. Infrapunakameran etu näkyvän valon alueella toimivaan kameraan verrattuna on sen kyky läpäistä savua, joka on karkeasti 20-kertainen ihmissilmän näkemän valon alueeseen verrattuna, (Quintiere 1995).



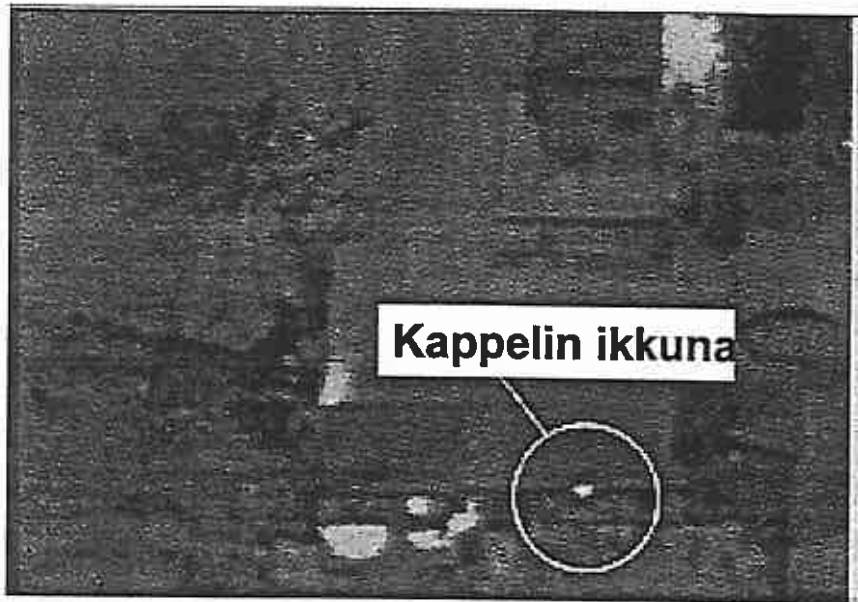
Kuva 4.19. Wacon kommuunirakennuksen pohjapiirros yksinkertaistettuna Quintieren ja Mowrerin (1993) raportin perusteella. Piirustus on vain likimäärin mittakaavainen (mitat metreinä).



Kuva 4.20. Wacon kommuunirakennus hiukan ennen paloa (Quintiere ja Mowrer 1993).

Infrapunakamerakuvien perusteella, täydennettynä videokamerakuvien näkymillä, kommuunissa voitiin havaita ainakin kolme erillistä palon syttymiskohtaa. Ne on kuvassa 4.19 esitetty laatikoilla, joista nuoli osoittaa havaittuun syttymiskohtaan.

Ensimmäinen syttyminen tapahtui oikeassa kulmatornissa klo 12:07:42. Toinen syttyminen tapahtui ruokasalissa noin minuuttia myöhemmin klo 12:08:48 ja kolmas syttyminen kappelissa klo 12:09:45. Kuvassa 4.21 on esitetty infrapunakameralla otettu näkymä kommuunista tällä kolmannen syttymisen hetkellä. Siinä näkyy kappelin ikkuna rengastettuna. Oikea kulmatorni, joka palaa jo voimakkaasti, on kappelista vasemmalle ja palava ruokasali kuvan oikeassa yläkulmassa. Nämä paikat olivat niin kaukana toisistaan, ettei mikään palon leviämisen mekanismi kykene selittämään niiden syntymistä yhdestä alkulähteestä (Quintiere 1995).



Kuva 4.21. Wacon kommuunirakennuksen infrapunakuva 3. syttymisen hetkellä (Quintiere 1995).

Quintieren (1995) lausunto syttymissyystä alakomiteoiden edessä oli hyvin yksiselitteinen:

- Nämä kolme paloa noin minuutin aikavälein on tahallisesti sytytetty kommuunissa.
- On ilmeistä, että nämä palot tarvitsivat sytytyslähteet, jotka oli tarkoituksellisesti asetettu kuhunkin paikkaan.
- Mikään näistä kolmesta palosta ei olisi voinut aiheuttaa mitään toista, sillä niiden kasvunopeus ei ollut riittävä tuottamaan lämpöä, joka aiheuttaisi syttymisen niin kaukana.
- Vaikka tavanomaiset sisusteet ja sisärakenteet mahdollistivat palon leviämisen, näiden palojen tavallista nopeampi leviäminen osoitti erityisesti ruokasalin ja kappelin alueilla, että jonkinlaista palavaa nestettä käytettiin erittäin suurella todennäköisyydellä.

Kuvassa 4.22 on esitetty kommuunin valokuva kappelin lieskahduksen jälkeen, mikä tapahtui noin 4 min syttymisestä.



Kuva 4.22. Kuva kommuunirakennuksesta kappelin (ylhäällä oikealla) lieskahdettua klo 12:13:49 (Quintiere 1995).

4.4.5 Pepcon Plant

USA:ssa Nevadan Hendersonissa 4.5. 1988 sattunut Pepconin ammoniumperkloraattitehtaan palo/räjähdyks (Mniszewski 1994). Ammoniumperkloraattia 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 perkloraattia, 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.

Tämän räjähdysten selvittämisessä käytettyä tapahtumapuuta on esitelty oppikirjan ensimmäisen osan kohdassa 6.1.

4.5 SUOMESSA SATTUNEITA MERKITTÄVIÄ TULIPALOJA

Seuraavassa esitetään lyhyesti ja luettelomaisesti joukko Suomessa sattuneita merkittäviä tulipaloja, joissa joko useat henkilöt menehtyivät, huomattava määrä omaisuutta tai korvaamattomia kulttuuriarvoja tuhoutui, tai jotka olivat muuten vartenotettavia. Kirjallisuusviitteiden artikkeleista tapahtumista on saatavissa lisää yksityiskohtaisempaa tietoa.

4.5.1 Hanasaaren turbiinihallin palo

Helsingin kaupungin energialaitoksen Hanasaaren B-voimalaitoksella syttyi 6.6.1986 tulipalo turbiinihallissa. Paloa ovat operatiiviselta kannalta kuvanneet Alho (1986), Mökkönen (1986) ja Kylänpää (1986). Itse palon kulusta, syistä ja vahingoista on selostus Ahosen julkaisemattomassa raportissa, johon tässä esitetty kuvaus pääosin perustuu. Tapahtumien alkaessa voimalaitoksella oltiin valmistautumassa voimalaitosyksikkö HaB-TG3:n vuosihuoltoon, jonka vuoksi sen 113 MW:n turbogeneraattori 3 oli erotettu sähköverkosta n. klo 15:13. Ennen lopullista pysäyttämistä koneella oli tarkoitus tehdä joitakin mittauksia eri pyörintänopeuksilla. Valvomosta suoritettujen ohjaustoimenpiteiden jälkeen turbiini pyöri tyhjäkäynnillä noin 50 r/s. Kolme miestä meni irrottamaan generaattorin liukurenkaalle tulevat magnetointipiirin kaapeleita. Näitä irrottaessa he kuulivat humautavan äänen, ja 15 ... 25 s:n kuluttua heidän jatkaessa työtään alueella syttyi hetkessä voimakas tulipalo. He pakenivat valvomoon, josta hälytettiin palokunta klo 15:19. Ensimmäiset sammutusyksiköt olivat paikalla noin 10 min:n kuluttua. Voimakas tulipalo saatiin hallintaan ja sammutetuksi noin klo 18 mennessä.

Palon jälkeen havaittiin, että samassa turbiinihallissa yksikkö HaB-TG4 oli päällisin puolin vaurioitumaton, mutta sen sijaan yksikkö HaB-TG3 oli pahoin palanut ja 2/3 hallin katosta sen yläpuolelta oli romahtanut alas. Myös osa lattiamattoa oli pahoin palanut. Turbogeneraattori HaB-TG4 saatiin kuitenkin vielä samana iltana pyörityslaitteella pyörimään, joten se ei ollut vaurioitunut.

Aluksi luultiin palon syyksi generaattorin vetyvuotoa, koska magnetointipiirin uskottiin olleen jännitteettömän. Kuitenkin työmiesten kertomuksesta oli pääteltävissä valokaaren syntyminen johdinta irrottaessa, ja paikalle mentäessä havaittiin metalliosissa oikosulun jälkiä. Yksi magnetointipiirin kaapeleista oli osunut tiivisteöljyputkeen ja valokaari oli polttanut siihen kaksi reikää. Niistä paineella purkautunut öljy syttyi valokaaresta ja öljyä paloi kaikkiaan lähes 15 tonnia. Lisäksi katon romahdettua huopakatteen bitumia paloi noin 32 tonnia. Generaattorin vety vuoti ulos palon aikana ja paloi aiheuttamatta räjähdystä. Palokuormana vedyn osuus oli mitätön.

Näistä havainnoista pääteltiin, ettei generaattorin magnetointipiiri ollutkaan jännitteeton, kuten luultiin. Myöhemmissä tutkimuksissa selvisi, että valvomosta operaattorin lähettämä käsky ei ollutkaan mennyt perille, koska kenttäkatkaisijan laukaisupiiri oli poikki löystyneen ruuvin vuoksi. Valvomosta generaattorin magnetointipiiri näytti jännitteettömältä, mutta tosiasiasa se olikin jännitteinen. Palon perimmäinen syy oli siten laitevika ja lisänä oli inhimillisiä tekijöitä.

Laitoksen korjaus kesti 9 kuukautta ja vaati palokohteessa 91 henkilötyövuotta. Vahingot olivat "vain" noin 40 mmk, koska turbogeneraattori voitiin korjata. Mikäli se olisi jouduttu vaihtamaan, vahingot olisivat nousseet yli 150 mmk:n. Lisäksi tuotannon menetyksen aiheuttamat kustannukset olivat noin 13 mmk. Jos olisi jouduttu tilaamaan uusi turbogeneraattori tuotannon keskeytys olisi ollut noin kaksi vuotta ja sen aiheuttamat kustannukset noin 50 ... 60 mmk.

4.5.2 Kuusankosken hakekuljettimen palo

Kuljetinjärjestelmän palo Kuusankoskella 8.5.1993 Kymin Paperiteollisuus Oy:n laitoksilla vaati kahden sammutukseen osallistuneen miehen hengen ja kolmannen loukkaantumisen (Kuusankosken palokuolemien tutkijalautakunta 1993). Hakkeenkuljetusjärjestelmä paloi 170 m:n matkalta ja molemmat jakokuljettimet tuhoutuivat.

Palossa oli merkittävää sen nopea leviäminen, joka johtui kuljetinhihnan palamisesta poikki. Katkennut ja palava hihna liukui rullaston kannattamana kohti kuorimoa. Palavan hihnan päät levittivät edetessään paloa kuljetinsillan rakenteisiin ja hihnan liikkeen vaikutuksesta irtoavaan puupölyyn. Tämä nopea leviäminen aiheutti sattuneet henkilövahingot. Koska Suomessa on runsaasti vastaavanlaisia kuljettimia, tällaisiin tapahtumiin olisi osattava varautua laitosten paloharjoituksissa. Tutkijalautakunta havaitsi laitoksen rakenteissa sekä turvallisuusjärjestelyissä merkittäviä puutteita.

4.5.3 Hotelli Heinolanhovin nestekaasuräjähdyks

Heinolassa tapahtui 20.4.1978 Hotelli Heinolanhovissa nestekaasuräjähdyks, joka vaati heti yhden henkilön hengen sekä myöhemmin vammoihinsa menehtyneinä lisäksi kahden muun henkilön hengen (Heinolan nestekaasuräjähdysonnettomuuden tutkijalautakunnan selostus, 1978).

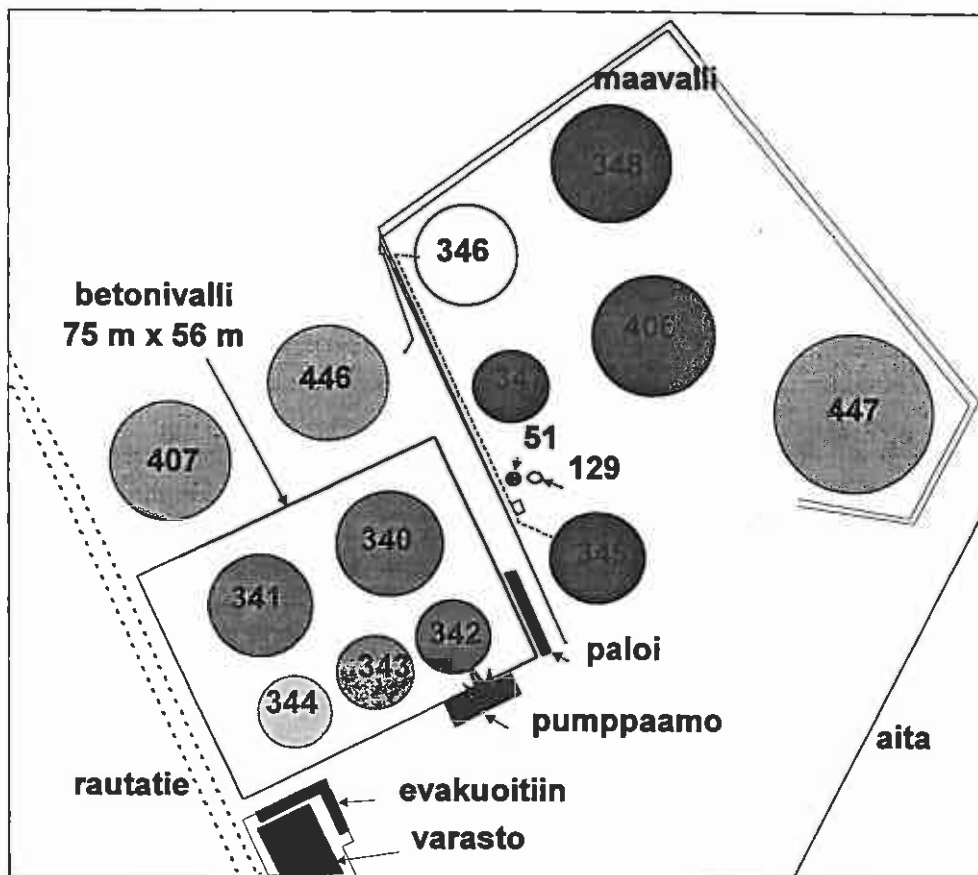
Hotellin uuni, liesi ja grilli olivat nestekaasukäyttöisiä. Nestekaasu varastoitiin 3,6 m³:n maanalaisessa säiliössä rakennuksen ulkopuolella. Säiliö oli tyhjentyneenä edellisenä iltana ja talonmies oli kytkenyt verkostoon tilapäisesti 11 kg:n nestekaasupullon irrottamalla keittiöön asennetun yhdysliittimen, jolloin putken pää jäi avoimeksi. Säiliötä seuraavana aamuna kello 6 jälkeen täytettäessä nestekaasua purkautui avoimesta putkesta keittiöön ja sen kautta muihinkin alakerroksen tiloihin. Kaasua virtasi n. 5 min ennen kuin se tunnistettiin hajusta. Kaasuseos räjähti 6:15 eli 12 min täytön alkamisen jälkeen todennäköisesti valaisimen katkaisijan sähkökipinästä. Räjähdyksessä osa rakennuksesta tuhoutui käyttökelvottomaksi ja hotellin majoitussiipi kärsi syttyneestä palosta vaurioita.

Illalla avonaiseksi jääneen putken pään ja säiliön välillä oli kolme sulkuventtiiliä, jotka kaikki osoittautuivat olleen auki, vaikka talonmies väitti sulkeneensa niistä kaksi. Matkalla oli lisäksi kaksi turvalaitetta, joiden tehtävänä oli sulkea linja, mutta ne oli tehty toimintakyvyttömiksi. Talonmiehellä ei ollut voimassa olevien säädösten mukaan oikeutta suorittaa yllä esitettyjä tilapäisiä kytkentätöitä. Lautakunta totesi raportin yhteenvedossa, että räjähdyksen syynä olivat useat

teknisten laitteiden luvattomat muutostyöt ja esitti suosituksinaan, että kiinteillä säiliöillä varustetuille nestekaasulaitoksille luotaisiin määräaikaistarkastusjärjestelmä sekä nestekaasun käyttöä ja vaaroja tehtäisiin paremmin tunnetuksi erilaisin menetelmin.

4.5.4 Kokkolan säiliöaluepalo

Kokkolassa Oy Esso Ab:n Ykspihlajan tuontivaraston pumppaamossa (kuva 4.23) syttyi 23.5.1973 tulipalo (Ölander 1973). Se havaittiin läheiseltä Outokumpu Oy:n voimalaitokselta, josta hälytettiin palokunta klo 3:10. Ensimmäisen Kokkolan palokunnan yksikön saapuessa paikalle klo 3:16 pumppaamosta nousi arviolta 30 m korkeat liekit, jotka kuumensivat säiliöitä 342 (moottoripetroli) ja 343 (benssiini). Suurpalohälytys annettiin välittömästi. Palokunnan ponnisteluista huolimatta nämä säiliöt ja lisäksi säiliöt 344 (valopetroli) ja 341 (benssiini) syttyivät seuraavan tunnin aikana. Lääninhälytyksen jälkeen kello 4:35 palokunta vetäytyi alkuasemista ja pelasti 4 säiliövaunua betonivallin viereiseltä radalta sekä keskittyi suojaamaan säiliöitä 407 ja 446, jotka sisälsivät dieselöljyä. Kuva 4.24 esittää tilannetta näihin aikoihin katsottaessa oikealle betonivallin vasemman yläkulman seutuville.



Kuva 4.23. Kokkolan säiliöaluepalon kaaviokuva. Syttymiskohta pumppaamossa. Dieselöljyä sisältävät säiliöt 407, 446 ja 447 säilyivät. Benssiinisäiliö 340 haihtui ja valui tyhjiin palamatta samoin kuin polttoöljysäiliö 347. Muut säiliöt paloivat tai räjähtivät. (K. Ölander 1973).

Betonivallin sisällä tapahtui räjähdyksiä klo 4:41, 5:06 ja 7:06. Tämän jälkeen tapahtui putkistoräjähdyksiä ja seuraavan tunnin kuluessa räjähtivät säiliöt 51 ("Varsol"), 129 (tyhjä), 406 (polttoöljy) voimakkaasti, 346 (tyhjä) voimakkaasti ja 348 (polttoöljy). Palokuntien ponnistelut keskitettiin suojaamaan säiliötä 447, jossa oli 10 000 m³ dieselöljyä, missä lopulta onnistuttiinkin. Viimeksi säiliö 345 (polttoöljy) syttyi klo 12:30. Itäisessä säiliökentässä räjähti vielä klo 13:45. Palo oli laajimmillaan kello 23:10, jolloin vallitukset kuohuivat yli. Viimeinen räjähdys sattui itäisessä kentässä klo 1:24. Alue paloi seuraavan vuorokauden ajan. Palokunnat keskittivät voimansa vallien vahvistamiseen sekä ympärillä olevien kohteiden suojaamiseen. Vaahtojen riittämättömyyden vuoksi varsinaiseen sammutushyökkäykseen ei ryhdytty. Viimeinen säiliö sammutettiin 25.5. klo 0:15, jonka jälkeen kohteita ryhdyttiin suojaamaan uudelleensyttymisen ehkäisemiseksi. Kello 12:00 voitiin siirtyä jälkivartiointiin. Vahinkojen määräksi arvioitiin yhteensä 5,6 mmk, josta sammutuskustannusten osuus oli 0,6 mmk.



Kuva 4.24. Kokkolan säiliöaluepalossa säiliö 341(keskellä) sekä säiliöt 344, 343 ja 342 (oikealla) ovat liekeissä, mutta säiliöstä 407 (vasemmalla) ja 340 (vesisuihkuista oikealle) polttoaine haihtui ja valui säiliön syttymättä, (K. Ölander 1973, kuva K. Laakso).

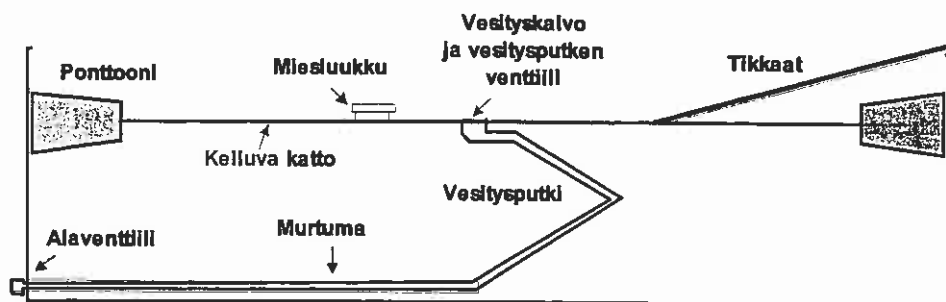
Tutkijalautakunta pystyi selvityksessään toteamaan varmasti vain, että palo on syttynyt pumppaamosta. Syttymissyö jäi arvailujen varaan, koska pumppaamo tuhoutui palossa erittäin perusteellisesti. Todennäköisenä syynä pidetään putkistovuotoa, koska varaston henkilökunnan kuulustelussa ilmeni, että

pumppuhuoneessa on ollut jatkuvasti palavan nesteen katkoa. Vuotaneen nesteen syttymismekanismista voitiin esittää vain arvailuja.

Palon varsinaisena syynä voitiin pitää laitoksen huonoa hoitamista (Ollila 1973). Useat laitteet ja varusteet olivat tarkoitukseen sopimattomia ja huonosti asennettuja. Kohteessa ei ollut automaattista paloilmoitinta, joten palokunta sai hälytyksen vasta noin 10 min:n kuluttua syttymisestä. Lisäksi kaikkien betonivallituksessa olevien bensiinisäiliöiden (340, 341 ja 343) juuriventtiilit olivat auki. Siten putkien rikkouduttua bensiiniä valui runsaasti vallitilaan, joka voimisti paloa huomattavasti. Näiden eri tekijöiden yhteisvaikutusta oli, että palo pääsi riistäytymään aluepaloksi.

4.5.5 Nesteen säiliöpalo

Neste Oy:n Porvoon jalostamolla oli 23. - 24.3. 1989 isoheksaanisäiliön tuhoutumiseen johtanut palo (Karlsson 1989, Suuronnettomuuden tutkintaselostus (STS) 2/1989). Keskiviikkona 22.3 ilmoitettiin klo 21:45 poikkeuksellisesta öljyvudosta. Tällöin keskusvalvomosta havaittiin säiliön R-2 (kuva 4.25) pinnan laskevan, ja kentämiehiä pyydettiin tarkistamaan asia. He havaitsivat säiliön vesityspotkusta tulevan bensiiniä, ja sulkiivat sen alaventtiilin. Heitä pyydettiin nousemaan säiliön katolle, jossa he havaitsivat runsaasti nestettä, eikä vesityspotken venttiili ollut näkyvissä. Vuoromestari meni selvittämään tilannetta ja totesi, että 'säiliön R-2 kelluvan katon päällä on bensiiniä'. Hän hälytti Neste Oy:n palokunnan klo 22:06. Päivystävä palomestari määräsi katon suojavaahdotettavaksi, ja klo 22:30 aloitettiin nesteen pumppaus katon päältä sen alle kahdella vesiturbiinipumpulla. Myöhemmin yöllä toimitettiin kaksi pumppua lisää. Katolla olevat kohteet on esitetty kaavamaisesti kuvassa 4.26. Vesityskaivon venttiiliä pyrittiin sulkemaan siinä onnistumatta. Säiliön katolle nostettiin klo 11:45 paineilmatulppa vuodon tukkimiseksi. Kova tuuli teki aukkoja suojavaahdotukseen, ja sen keskellä oli halkaisijaltaan 5 ... 7 m:n alue, jossa oli vapaa isoheksaanipinta. Isoheksaania, mikä oli säiliössä varastoitu neste, oli katon päällä 1,1 m.



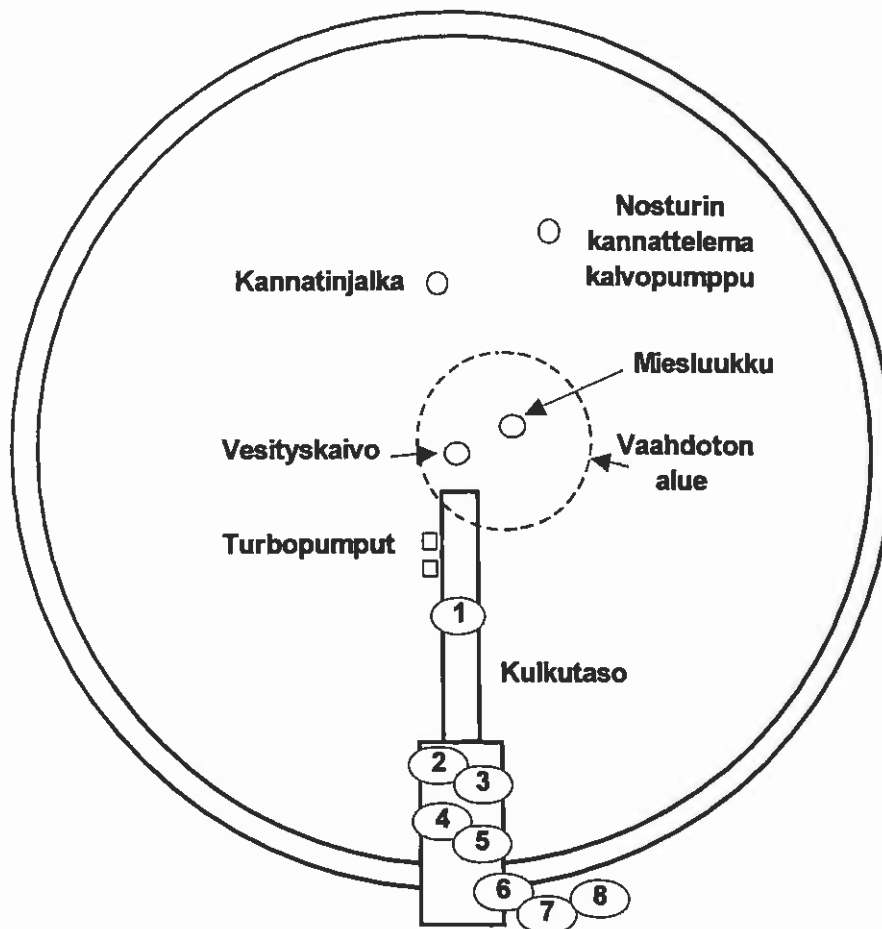
Kuva 4.25. Leikkaus isoheksaanisäiliöstä (STS 2/1989).

Ensimmäisen syttymisen hetkellä klo 12:27 henkilö 1 suuntasi vaahdotussingon suihkun kannatinjalkaan, jotta suihku ei osuisi suoraan nesteen pintaan. Sitten hän siirsi suihkua lähemmäksi vaahdotonta aluetta, kunnes isoheksaani syttyi. Liekit levisivät koko vaahdottomalle pinnalle (20 ... 40 m²) 1 ... 1,5 s sisällä. Porvoon aluehälytyskeskus sai ilmoituksen palosta klo 12:31, ja tämän jälkeen annettiin

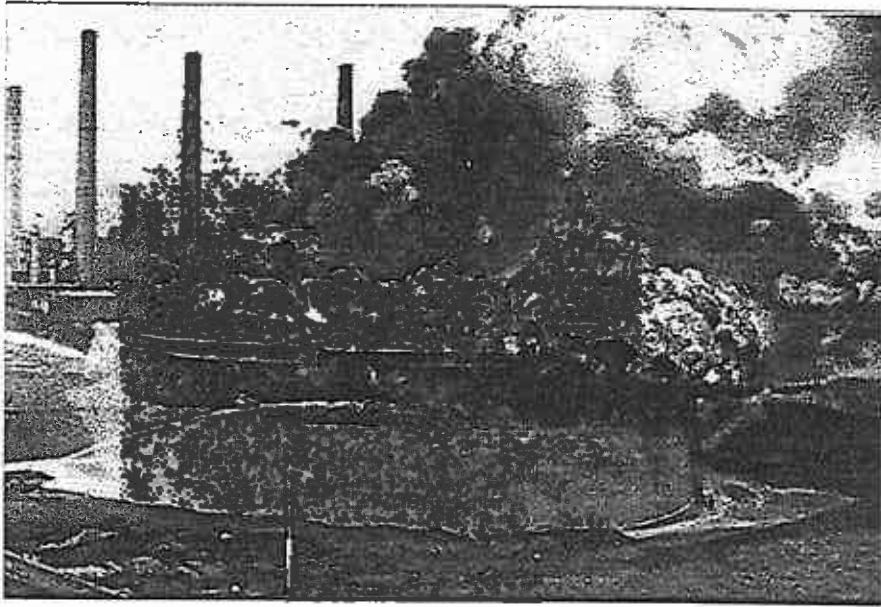
toisen asteen suurpalohälytys. Noin 12 min:n kuluttua syttymisestä kaikille sammutusyksiköille annettiin käsky vaahtoiskusta. Palo saatiin sammumaan klo 13:29 ja vaahtotus lopetettiin klo 13:44, kun kerroksen paksuus oli arviolta 0,3 m.

Puolen tunnin kuluttua vaahton havaittiin ohentuneen huomattavasti ja lisävaahdotus aloitettiin heti. Noin 1 ... 2 min:n kuluttua vaahtotuksen aloittamisesta neste syttyi uudelleen klo 14:12. Pian havaittiin, ettei uusi vaahtoisku onnistu vaahtojen vähenemisen ja pumppujen toimintahäiriöiden vuoksi. Säiliö päätettiin tyhjentää sen palaessa loppuun, sekä keskityttiin suojaamaan naapurisäiliötä. Kuvassa 4.27 on näkymä palosta toisen syttymisen jälkeen.

Säiliön R-2 reuna taipui kuumuudesta kriittisesti 24.3. klo 01:00 jälkeen. Seinämän repeämistä pelättiin, jolloin palo olisi levinnyt koko säiliötä ympäröivään vallitilaan. Silloin myöskin naapurisäiliöt olisivat vaarantuneet palotehon kasvettua moninkertaiseksi. Palo jatkui kuitenkin hallitusti ja se sammui 24.3. klo 20:00 polttoaineen loputtua. Säiliön paloteho oli suurimmillaan luokkaa 12 GW, mikä on samaa suuruusluokkaa kuin Suomen nykyinen sähköntuotantokapasiteetti.

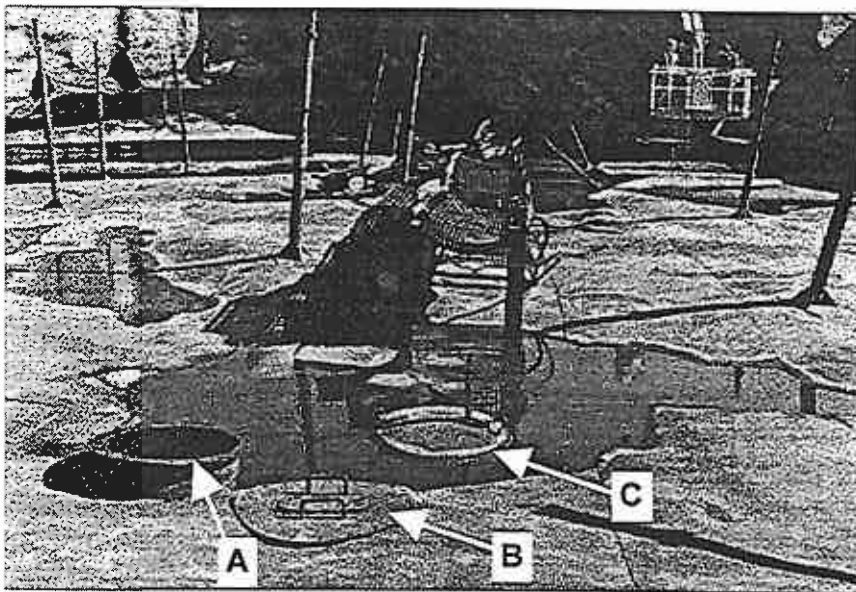


Kuva 4.26. Tilanne isoheksaanisäiliön kelluvalla katolla juuri ennen syttymistä. Soikioiden sisällä olevat numerot tarkoittavat katolla syttymishetkellä olleita henkilöitä (STS 2/1989).

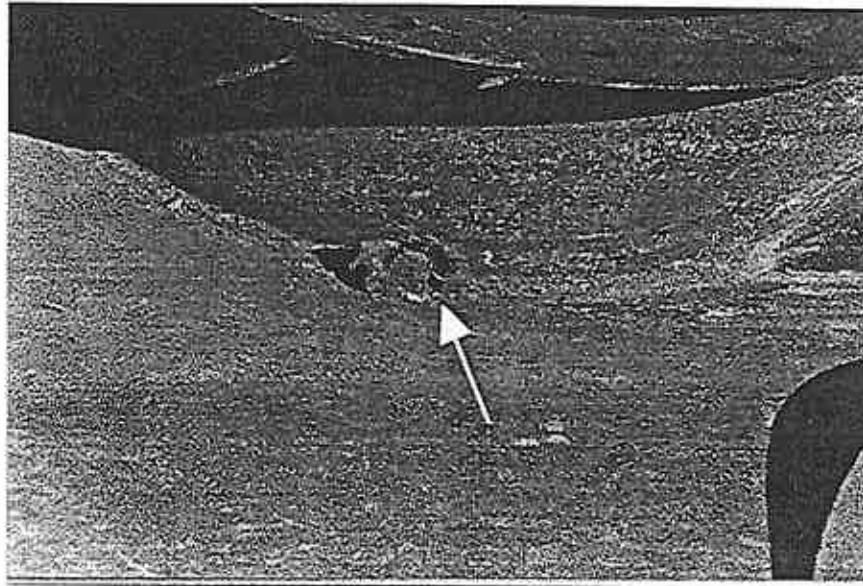


Kuva 4.27. Isoheksaanisäiliön palo toisen syttymiskerran jälkeen (STS 2/1989).

Isoheksaanin pääsy kelluvan katon päälle selvisi tutkintalautakunnan mennessä ensi kerran palaneen säiliön uponneen katon päälle. Kuvasta 4.28 näkyy, että miesluukku (A) oli auki, ja sen kansi (B) oli siirtynyt kokonaan aukon päältä. Sitä vastoin vesityskaivon kansi (C) oli paikoillaan. Miesluukun kannen aukeaminen selittyi kuvassa 4.29 näkyvillä ruuveilla (nuoli): huoltotöiden aikana kannen ruuvit oli leikattu poikki, mutta kansi oli jätetty paikoilleen. Huollon päätyttyä ruuvit oli unohdettu uusiksi, joten kansi oli irrallaan.



Kuva 4.28. Palon jälkeen miesluukku (A) on avoin ja sen kansi (B) on siirtynyt luukun viereen, mutta vesityskaivossa (C) on kansi kiinni (STS 2/1989).



Kuva 4.29. Miesluukun laipan vierestä löytyi katkaistuja ruuveja (nuoli) (STS 2/1989).

Tutkijalautakunnan raportissa isoheksaanisäiliön syttymiselle ei löydetty selvää syytä, mutta se selvisi muuta kautta hiukan myöhemmin (Howells 1993). Samankaltaisia säiliöpaloja sattui Pohjois-Amerikassa 1968, 1978, 1985 ja 1990, Singaporessa 1988 ja Englannissa 1991. Tämän viimeksi mainitun palon tutkimusten yhteydessä havaittiin, että kaikki edellä mainitutkin olivat syttyneet palomiesten vaahdottaessa lammikkoa säiliön vajonneen katon päällä. British Petroleum käynnisti tutkimukset ilmiön fysikaalisen syyn löytämiseksi.

Pian havaittiin, että vaahdon hajotessa siinä oleva vesi vajoaa pieninä pisaroina öljytuotteita raskaampana säiliön pohjalle. Tässä vajoamisessa pisarat varautuvat, ja synnyttävät hyvin eristävään dielektriseen säiliön öljyyn voimakkaan sähkökentän. Klinkenberg ja van der Minne (1958) olivat tehneet sarjan kokeita, jossa he havaitsivat tämän ilmiön öljytuotteilla. Pienten hiukkasten laskeuman aiheuttaman varautumisen Dorn (1880) havaitsi jo lähes sata vuotta aiemmin. Klinkenberg ja van der Minne (1958) keräsivät kirjallisuudesta öljytuotteille johdetut yhtälöt pienten vesipisaroiden laskeutumisen aiheuttamalle varautumiselle ja sovelsivat niitä selittäessään tekemiensä mittausten tuloksia. He kykenivät saamaan aikaan varautumista erilaisille öljytuotteille, pisaroiden laskeutumisesta, sekä niiden pumppaamisesta säiliöstä toiseen tai säiliöissä sekoittamisessa. He tekivät myös täysmittaisia kokeita suurilla säiliöillä. Niissä ilmiö on herkempi kuin pienkokeissa, koska suuresta nestemäärästä varaukset eivät pääse purkautumaan maahan kovin helposti.

Klinkenberg ja van der Minne (1958) kehittivät myös pientestin öljytuotteen varautumisherkyyden mittaamiseksi. Siinä tiputetaan öljyä 0,5 m kapillaariputken läpi sähköisesti erittäin hyvin eristettyyn kuppiin, joka on yhdistetty elektrometrin elektrodiin.

Kun verrataan Neste Oy:n säiliön syttymistä kuvan 4.26 yhteydessä selostettuihin tapahtumiin, on selvästi nähtävissä, että nestepinnan varautuminen selittää havaitun syttymisen kummallakin syttymiskerralla erittäin hyvin. Ensimmäisellä syttymiskerralla isoheksaanikerroksen paksuus oli yli 1,1 m, mikä oli niin suuri, että nesteen ilmaan rajoittuvan vapaan yläpinnan ja sen maatettuun säiliön kattoon rajoittuvan alapinnan välille voi syntyä niin suuria potentiaalieroja, että sähkökipinän muodostuminen oli mahdollista. Vaahtoa oli ollut pinnalla jo yli kymmenen tuntia. Sitä oli hajonnut jo melkoisesti ja siitä vapautunut vesi oli isoheksaania raskaampana painunut säiliön pohjalle. Pisaroiden virratessa isoheksaanissa niiden pinnoilla tapahtuu varauksen erottumista, mikä hyvin eristävässä aineessa aiheuttaa vapaan nestepinnan potentiaalisen saavan huomattavasti maan potentiaalista eroavia arvoja. Potentiaaliero oli suurimmillaan kuvan 4.26 vaahdottoman kohdan keskellä. Kun singon vaahtosuihku osui lähelle tätä pintaa, siitä lähti sähköpurkaus pitkin suihkua kohti maan potentiaalisissa olevaa singon suutinta. Purkaus (kipinä) kykeni sytyttämään pinnan lähellä olevan isoheksaanihöyryn. Silminnäkijät vahvistivat kertomuksissaan tapahtumien tämänkaltaisen kulun sekä myös ensimmäisen syttymisen paikan.

Ennen toista syttymistä myös nesteen vähitellen paljastuvaa pintaa oltiin vaahdottamassa. Nytkin mekanismi oli sama kuin edellä mainitussa tapauksessa. Tosin tällä kertaa muutkin tutkijalautakunnan mainitsevat asiat, kuten säiliön katon ja seinän välissä olevat, edellisestä palosta kytemään jääneet puusoirot voivat olla mahdollisia uudelleensyöttäjiä. Kuitenkin tässäkin varautumisesta syttyminen näyttää olevan paremmin sopusoinnussa tehtyjen havaintojen kanssa.

4.5.6 Luettelo merkittävistä tulipaloista

Suomessa sattuneista suurista tulipaloista sisäministeriö ja vakuutusyhtiöt ovat pitäneet tietokantoja. Niistä on julkaistu ajoittain esimerkiksi kymmenvuotiskatsauksia (Anon. 1966 ja Kontio 1986). Taulukkoon 4.4 on koottu kirjallisuudesta luettelomaisia tietoja Suomessa vuosina 1950 - 1997 sattuneista merkittävistä tulipaloista. Luetteloon on merkitty tapahtuman päivämäärä, paikkakunta, kohde ja sytymissy, mikäli se on tiedossa. Sen lisäksi on annettu tietoja henkilö- ja aineellisista vahingoista sekä viite julkaistuun lähteeseen, jossa tapausta on käsitelty. Taulukon 4.4 luettelo ei ole kattava eikä systemaattinen, sillä nämä ehdot täyttävän luettelon tekemiseen ei tässä yhteydessä ollut aikaa eikä resursseja. Lähteinä on käytetty lähes pelkästään kahta julkaisusarjaa: Palontorjunta - Brandvärn -lehteä (julkaistu vuodesta 1950, vuodesta 1993 nimellä Pelastustieto - Räddning; lyhenne viiteluettelossa PT) sekä Palontorjuntatekniikka -lehteä (julkaistu vuodesta 1970 lähtien; lyhenne viiteluettelossa PTT). Teollisuusvakuutus-lehden vahinkokatsauksia on käytetty täydentämään teknisiä yksityiskohtia ja vahinkoarvioita. Näiden lisäksi on käytetty onnettomuustutkintalautakunnan raportteja, silloin kun niitä on ollut käytettävissä alkuperäisinä, tai tieteellisestä käytännöstä poiketen raporteista mainituissa lehdissä esitetyt referaatit. VTT:ssä ei ole lautakuntien raporteista kattavia sarjoja, koska niiden asettajat, heidän toimipaikkansa sekä ryhmien kokoonpano vaihtelevat eikä VTT:n edustaja ole niissä kovinkaan usein mukana. Vanhojen raporttien hankinta olisi myöskin hyvin työlästä, minkä vuoksi on poikettu alkuperäisteosten käytöstä.

Kuitenkaan varsinaisen lehdistön aineistoa (päivä- ja aikakauslehtiä) ei ole laatusyistä kelpuutettu mukaan, vaikka niistä olisi saatavissa varsinkin näyttävää kuva-aineistoa. Näistä syistä taulukon 4.4 pikkutarkkaan oikeellisuuteen on suhtauduttava tietyin varauksin. Se onkin tarkoitettu yleiskatsaukseksi sattuneisiin tapahtumiin sekä ensimmäiseksi lähteeksi ja viitteeksi asian tarkempaan perehtymiseen lähdetessä. Taulukko ei ole myöskään kattava, sillä kaikista paloista ei mainituissa sarjoissa ole kirjoitettu niiden merkittävydestä huolimatta.

Tapahtumien valinnassa on karkeina mittareina käytetty henkilö-, omaisuus- ja ympäristövahinkoja sekä kulttuuriarvoja. Lisäksi mukaan on otettu tapahtumia, jotka jollain muulla tavalla, esimerkiksi havaittujen paloilmiöiden tai vahinkojen luonteen perusteella ovat vaikuttaneet kiinnostavilta. Kaikki mittarit ovat kuitenkin olleet kvalitatiivisia ja rajanveto perustuu pelkästään kirjoittajien subjektiivisiin mieltymyksiin. Tapahtumien kuvausten lukeminen noin viidenkymmenen vuoden aikajänteellä taaksepäin on kuitenkin osoittanut tämän tekijöille, etteivät vanhat asiat ole pelkästään historiaa. Samat ilmiöt pyrkivät pulpahtamaan aika ajoin uudestaan esille, kun niiden torjuntakeinot tai torjunnan perusteet ovat painuneet unohduksiin. Myöskin pitkällä aikajänteellä sattuneiden tapahtumien kirjoa on tarpeellista ymmärtää, sillä harvinaisia mutta merkittäviä paloilmiöitä ei Suomen kaltaisessa pienessä maassa tapahdu joka vuosi.

Taulukko 4.4. Merkittäviä tulipaloja Suomessa vuosina 1950 - 1997. Vahinkojen lyhenteet: K (kuolleet), L (loukkaantuneet), A (aineellisen vahingon arvio, miljoonaa markkaa tapahtumahetkellä; huomaa markan arvon muutoksen vaikutus ennen v. 1963).

R	Vuosi	Päivämäärä	Paikkakunta	Palokohde	Syttymissy	Vahingot		
						K	L	A
1	1997	21.9.	Vammala	kirkko	tahallinen	0	0	
2	1997	3.2.	Ranua	kalustetehtas	kipinä	0	1	10
3	1997	11.1.	Vaasa	rmyymälä		0	0	6
4	1996	26.12.	Lahti	huoneisto	kynttilä	2	0	
5	1996	24.12.	Punkalaidun	omakotitalo		4	0	
6	1996	3.6.	Kärkölä	lautatarha	hankautuminen	0	0	70
7	1995	23.12.	Kuhmoinen	hotelli	tupakoimi?	1	0	
8	1995	16.8.	Rauma	kuorimo	tulityö	0	0	6
9	1995	18.5.	Vantaa	oppilaitos		0	0	
10	1995	?3.	Leivonmäki	saha		0	0	15
11	1995	4.3.	Juankoski	automarket		0	8	10
12	1995	22.1.	Ylivieska	urheiluhalli	laitevika	0	0	2
13	1994	19.5.	Helsinki	öljysäiliö	kipinä	1	0	3 ... 4
14	1994	9.7.	Punkaharju	vaneritehtas	tulityö	0	0	15
15	1994	11.3.	Joutseno	teollisuushalli	kipinä	0	1	6
16	1993	19.11.	Tampere	asuintalo		0	0	
17	1993	18.10.	Orivesi	tehtas		0	0	50
18	1993	8.8.	Lohja	tehdashalli	ylikuumentuminen	0	0	8
19	1993	12.7.	Riihimäki	öljylammikko	kolari	0	0	2
20	1993	8.5.	Kuusankoski	hakekuljetin	hankaus	2	1	0 ... 50
21	1993	19.2.	Ilmajoki	maatalo	tupakka?	6	0	
22	1992		Merijärvi	huoltoasema	tahallinen	0	1	1,3

1. J. Katajamäki, Tyrvään kirkon palossa tuhoutui kansallisaarre, PT 48:8 (1997) 8.
2. M. Pekkala, Räjähdysmäinen palo tuhosi huonekalutehtaan, PT 48:3 (1997) 8 - 10.
3. S. Kakkuri, Palavat nesteet roihusivat kerrostalossa Vaasassa, PT 48:2 (1997) 8 - 9. C. Norgård, Pauke muistutti pikakiväärin käyntä, PT 48:2 (1997) 9 - 10.
4. J. Katajamäki, Lahden kerrostalopalo, PT 48:1 (1997) 8 - 19.
5. J. Hällfors, Neljä ihmistä kuoli jouluaaton tulipalossa Punkalaitumella, PT 48:1 (1997) 22.
6. K. Sipilä, Palokunnat pelastivat 121 miljoonaa Kärkölän lautatarhapalossa, PT 47:6 (1996) 8 - 11.
7. J. Katajamäki, Kuhmoisten hotellipalo, PT 47:1 (1996) 8 - 13. A. Koivu, Palomestarioppilas osui ensimmäisten joukossa palopaikalle, PT 47:1 (1996) 14 - 15.
8. A. Joelson, Tulityöt aiheuttivat 6 miljoonan vahingot kuorimossa Raumalla, PT 46:7 (1995) 8 - 9.
9. A. Latvala, Hankala ullakkopalo työllisti tuntikausia, PT 46:5 (1995) 8 - 12.
10. J. Kautto, Jauhesammutin aiheutti pölyräjähdysten, PT 46:3 (1995) 8 - 10.
11. E. Rissanen, Automarketti paloi maan tasalle Juankoskella, PT 46:4 (1995) 10 - 11.
12. J. Katajamäki, Virheellinen asennus syynä nestekaasuräjähdykseen, PT 46:1 (1995) 10 - 12.
13. M. Järvinen, Bakteeritoiminnan muodostama metaanikaasu tuhosi lämpökeskuksen Helsingissä, PT 45:9 (1994) 10 - 13.
14. J. Silmäni, Punkaharjun Finforestilla 15 miljoonan tulityövahinko, PT 45:7 (1994) 10 - 11.
15. A. Mäkelä, Ennaltaehkäisyä ja etupainotteisuutta, PT 45:3 (1994) 13.
16. S. Männikkö ja O-P. Ojanen, Aluepalo uhkasi Tampereella, PT 44:10 (1993) 10 - 11.
17. M. Honkala, Myrkylliset palamistuotteet uhkasivat sammuttajien ja asukkaiden terveyttä, PT 44:9 (1993) 16 - 18.
18. P. Jurvanen, Kertopuutehtaan raju kattopalo, PT 44:7 (1993) 14 - 16.
19. R. Paajanen, Moottoritie paloi Riihimäellä, PT 44:6 (1993) 8 - 10.
20. J. Katajamäki, Sammutustyö korkeuksissa vaati kaksi kuolonuhria sellutehtaan hakekuljettimella Kuusankoskella, PT 44:4 (1993) 8 - 9. Anon., Tutkijalautakunnan raportti: Kuljetinjärjestelmän palo Kuusankoskella 8.5.1993, Sisäasiainministeriö 1993, 32 s. + 18 s. liitt.
21. J. Köykkä, Kuusi perheenjäsentä kuoli maatalon palossa Ilmajoella, PT 44:2 (1993) 10 - 12.
22. T. Vähäkangas, Räjähdysmäinen huoltamopalo Merijärvellä, PT 44:1 (1993) 8 - 9.

Taulukko 4.4, jatkoa.

R	Vuosi	Päivämäärä	Palkkakunta	Palokohde	Syttymissyy	Vahingot		
						K	L	A
1	1992	23.7.	Forssa	urheilutalo	kipinä	0	0	15
2	1992	5.7.	Haukipudas	rivitalo		4	0	
3	1991	23.7.	Pudasjärvi	vanhustentalo		1	0	
4	1991	1.1.	Kankaanpää	myymälä		1	0	3
5	1990	16.7.	Lappeenranta	autofiike	oikosulku?	0	0	40
6	1990	4.8.		autolautta	laitevika	0	0	
7	1990	18.8.	Ylivieska	tiilitehdas	kodinkone	0	0	3 ...19
8	1990	5.10.	Hankasalmi	pesuainetehdas	tahallinen	0	0	20
9	1989	10.12.	Tampere	ullakko	tahallinen	0	0	2
10	1989	27.8.	Hamina	säiliövaunu	vuoto	0	0	
11	1989	22.4.	Nurmijärvi	muovitehdas	hitsauskipinä	0	0	21
12	1989	22.4.	Harjavalta	kaasutehdas	hitsausvirhe	0	3	121
13	1989	6.4.	Joensuu	rivitalo	?	5	0	
14	1989	18.3.	Kuhmo	kirkko	tahallinen	0	0	5,5
15	1989	23-24.3.	Porvoon mlk	säiliö	kipinä	0	0	30
16	1988	30.7.	Järvenpää	huoneisto	tupakointi	2	1	
17	1987	22.9.	Helsinki	puutavaravarasto	tahallinen	0	0	20
18	1987	18.3.	Helsinki	muovit	kuuma esine	0	0	50
19	1986	18.7.	Tampere	puuvillavarasto	tulitikkuleikki	0	0	9
20	1986	13-14.4.	Tuusula	varasto	toinen palo	0	10	
21	1986	23.3.	Lieto	omakotitalo	tupakointi?	7		
22	1985	21.8.	Pietarsaari	kirkko	tahallinen	0	0	

1. E. Jokinen, Paljeoven lyhentäminen maksol 15 miljoonaa, PT 43:7 (1992), s. 8 - 9.
2. A. Kärppä, Rajusti levinnyt palo summasi neljä lasta rivitaloturmassa, PT 43:7, s. 10 - 12.
3. K. Kuosmanen, Käytävälle asennetut palovaroitimet pelastivat kuuden ihmisen hengen Pudasjärvellä, PT 42:6 (1991) 10 - 11.
4. A. Teelmäki, Kodinkoneliikkeen palosta yli 3 milj. mk:n vahingot, PT 42:1 (1991) 8 - 9.
5. P. Kittelä, I. Niemi, E. Kajaslä ja J. Vakkila, Konela Oy:n palosta yli 40 milj. vahingot, PT 41:8 (1990) 10 - 12.
6. Anon. Mariellan sammutusjärjestelmä toimi suunnitelmien mukaisesti, PT 41:6 (1990) 10. M/S Mariellan tutkintalautakunta, Tutkintaselostus M/S Mariellan konehuoneessa Suomenlahdella 4.8.1990 syttyneestä tulipalosta, Suuronnettomuuden tutkintaselostus N:o 1/1990, Oikeusministeriö, (1990), I osa, 118 s. + 12 s. liitt.
7. T. Vähäkangas, Miljoonavahingot tiilitehtaan palosta Ylivieskan Raudaskylällä, PT 41:7 (1990) 8 - 9.
8. T. Hänninen, Nuorukainen sytytti työpaikkansa tuleen - palovahingot 20 milj. mk, PT 41:9 (1990) 8 - 9.
9. S. Lehtinen, Kaupunginmuseon ullakkovaraston palo Tampereella, PT 41:1 (1990), 10-11.
10. J. Karlsson, Ratapihan puutteellinen palovarustus ongelmana vaununpalon sammuttamisessa. Viisi säiliövaunua paloi Haminassa, PTE 40:7 (1989) 12-14.
11. S. Viljakainen, Teollisuusvakuutus 4/1990, 18 -19.
12. S. Viljakainen, Teollisuusvakuutus 4/1990, 18 -19.
13. P. Päivinen, Viisi menehtyi rivitalopalossa Joensuussa. Huoneiston osastoinnin pitäisi ulottua vesikattoon saakka, PT 40:4 (1989), 12 - 14.
14. I. Pulkkinen, Jälleen arvokas puukirkko tuhoutui murhapoltossa, PT 40:3 (1989), 12-13.
15. J. Karlsson, Säiliöpalosta 30 miljoonan vahingot Nesteen Sköldvikin jalostamolla, PT 40:3 (1989) 14 - 17. Sköldvikin säiliöpalon tutkintalautakunta, Tutkintaselostus Neste Oy:n Porvoon tuotantolaitosten varastosäiliön R-2 tulipalosta 23.-24.3.1989, Suuronnettomuuden tutkintaselostus N:o 2/1989, Oikeusministeriö, Helsinki 1990, 78 s.
16. Anon., Järvenpään palo 30.7.1988, Tutkijalautakunnan selvitys, Sisäasiainministeriö, 1988, 59 s., J. Katajamäki, Järvenpään palokuolemista laaja selvitys, PT 40:1 (1989) 12 - 25.
17. M. Rissanen ja J. Nieminen, Tuhopolttaja aiheutti miljoonavahingot Metsä-Serian varastoilla Helsingissä, PT 38:8 (1987), 508 - 512.
18. J. Sirola, Sitkeä elektroniikkavaraston palo Pitäjänmäellä Helsingissä, PT 38:3 (1987), 160 - 163.
19. S. Viljakainen, Omaisuusvahinkokatsaus, Teollisuusvakuutus 1/1988, s. 30 - 32.
20. T. Hietaniemi, Kymmenen henkeä loukkaantui Tuusulan räjähdysnettomuudessa, PT 37:5 (1986) 312 - 313.
21. Anon., Tupakka lai kynttilä syynä Liedon viime keväiseen omakotitalon paloon, PT 37:8 (1986) 508.
22. J. Heikkinen, Pietarsaaren murheellinen loppukesä: Kaksi kirkkopaloa kahden viikon aikana - molemmat tuhopolttoja, PT 36:6-7, 396 - 400.

Taulukko 4.4, jatkoa.

R	Vuosi	Päivämäärä	Paikkakunta	Palokohde	Syttymissy	Vahingot		
						K	L	A
1	1985	17.6.	Vantaa	maalitehdas	karkausreaktio	0	0	1,4
2	1985	19.5.	Harjavalta	nikkeliuuni	laitevika	0	0	8
3	1985	6.4.	Porvoon mlk	laiva	törmäys	0	0	
4	1985	30.4.	Nivala	omakotitalo	liesi unohtunut päällä	3	1	
5	1985	5.1.	Ruokolahti	omakotitalo	viallinen uuni	4	0	
6	1984	7.1.	Vilppula	kalustetehdas	kuuma esine	0	0	45
7	1984	22.1.	Hämeenlinna	asema	tupakointi	0	1	2
8	1983	11.11.	Turku	tavaratalo	tahallinen	0	0	26
9	1983	12.11.	Voikkaa	kerrostalo	tupakointi	4	0	
10	1983	10.9.	Savonlinna	omakotitalo	tahallinen	2	2	
11	1983	16.3.	Jyväskylä	voimalaitos	takatuli	1	0	
12	1982	14.2.	Vammala	kirkko	höyryputki	0	0	5 ... 10
13	1981	14.9.	Helsinki	kerrostalo	kaasuräjähdyks	2	2	
14	1981	21.9.	Lahti	kaupungintalo		0	0	
15	1981	19.9.	Helsinki	autiotalo	alkoholistit	6	0	
16	1981	30.7.	Äänekoski	CMC-varasto	räjähdyks	0	0	13
17	1981	20.5.	Pori	kutomosafi	sähkömoottori	0	0	100
18	1981	17.5.	Haapavesi	kirkko	tahallinen	0	0	
19	1980	17.1.	Vaasa	saha	tahallinen	0	0	10
20	1980	7.3.	Turku	linna	tahallinen?	0	0	
21	1979	23.1.	Virrat	vanhainkoti	tupakointi	27	0	
22	1979	2.1.	Liekksa	kirkko	sähköjohto	0	0	

- S. Viljakainen, Omaisuusvahinkokatsaus, Teollisuusvakuutus 1/1987, s. 8-10.
- S. Viljakainen, Omaisuusvahinkokatsaus, Teollisuusvakuutus 3/1986, s. 36-37.
- J. Karppala, Rahtilaiva Sallan tulipalo, PT 36:4 (1985) 228 - 231.
- Anon. Munkinpaistosta kolmen lapsen surma, PT 36:4 (1985) 232.
- J. Heikkinen, Neljä menehtyi palavaan taloon Ruokolahdella, PT 36:2 (1985) 85 - 86.
- J. Heikkinen, Suurpalo Kolhossa, PT 35:1 (1984) 10 - 12. S. Viljakainen, Teollisuusvakuutus 3/1985, 36 - 37.
- H. Toivonen, Hämeenlinnan arvokas asemarakennus paloi pahoin, PT 35:1 (1984) 12 - 13.
- P. Willman, P.S. Turjas ja T. Kuusela, Tavaratalo sortui puolen tunnin palon jälkeen. Monella tavalla erilainen tulipalo Turun keskustassa, PT 34:10 (1983) 560 - 565. Anon. Tavaratalon tutkijalautakunnan selvitys valmis, PT 35:2 (1984) 80 - 89.
- Anon. Marraskuun musta viikonloppu, PT 34:10 (1983) 568 - 569.
- P. Ritola, Räjähdyspanos tulipalon syyttäjänä, PT 34:10 (1983) 570 - 571.
- Anon., Savelan voimalaitoksen turvepölyräjähdyks, Työsuojeluhallitus, Selvityksiä 10.83, 47 s. + 44 s. liitt.
- E. Savolainen, Kirkkopalo jälleen - nyt Vammalassa, PT 33:2 (1982) 75 - 77.
- R. Alho, Sarja kaasuonnettomuuksia ja -vaaratilanteita Helsingissä, PT 32:8 (1981) 400 - 407.
- L. Pastila ja T. Alenius, Kulttuurihistoriallisesti arvokas kaupungintalo vaurioitui pahoin tulipalossa Lahdessa, PT 32:8 (1981) 408 - 409.
- J. Katjamäki, Asuttu autiotalo - kohde jota vastaan kunnan palo- ja pelastustoimi on aseeton, PT 32:8 (1981) 411.
- A. Mattila, Räjähdyks ja sitä seurannut suurpalo Äänekoskella, PT 32:6-7 (1981) 326-328.
- L. Syrjä, Suomen tuhoisin suurpalo Porissa, PT 32:5 (1981) 256 - 261.
- T. Saastamoinen, Haapavesi menetti arvokkaan puukirkkonsa, PT 32:5 (1981) 266 - 268.
- Anon. Yli 10 milj. mk:n palovahingot Kronvikin sahan palosta Vaasassa, PT 31:2 (1980) 78 - 79.
- R. Saarinen, Tulipalo uhkasi tuhota historiallisesti arvokkaan Turun Linnan, PT 31:3 (1980) 136 - 140.
- Anon. Virtain kunnalliskodin palo vaati 27 vanhuksen hengen, PT 30:1 (1979) 8 - 9.
- Anon. Lieksan kirkkopalon syy sähköjohtoissa, PT 30:1 (1979) 10 - 11.

Taulukko 4.4, jatkoa.

R	Vuosi	Päivämäärä	Paikkakunta	Palokohde	Syttymissy	Vahingot		
						K	L	A
1	1978	8.4.	Helsinki	osakuntatalo	huolimaton tulenkäsi	0	0	
2	1978	20.4.	Heinola	hotelli	avoin putki	3	3	
3	1977	22.11.	Rauma	teollisuushalli		2	2	
4	1976	29.12.	Varkaus	paperivarasto	tahallinen	0	0	46
5	1976	8.2.	Eurajoki	ydinvoimala		0	7	
6	1976	13.4.	Lapua	patruunatehdas	laitevika	40	32	
7	1975	28.2.	Eno	saha	hitsauskipinä	0	0	15
8	1974	19.6.	Vammala	muovitehdas	laitevika	1	6	
9	1974	23.7.	Helsinki	varasto	tahallinen?	0	0	10
10	1974	1.8.	Kokkola	tukkuliike	laitevika?	0	0	7
11	1974	31.7.	Helsinki	varasto		0	0	5
12	1974	7.6.	Helsinki	omakotitalo		5	0	
13	1972	11.12.	Espoo	öljysäiliö		0	0	
14	1971	31.7.	Tornio	lautatarha		0	0	6,2
15	1971	30.3.	Pori	autokorjaamo	hitsauskipinä	0	0	0,5
16	1970	24.6.	Kalajoki	metsäpalo		0	0	
17	1970	4.7.	Helsingin mlk	maastopalo		1	4	
18	1969	17.6.	Bromarv	räjähdy		4	15	0,5
19	1968	14.8.	Mikkeli	vaneritehdas	pölyräjähdy			1,5
20	1968	2.1.	Turku	telakka	tulityö	5		
21	1968	2.3.	Kerava	säiliövaunu		0	0	
22	1967	31.3.	Espoo	tennishalli	ylikuumeneminen	0	0	0,56

1. B. Winqvist, Vanhan Ylioppilastalon palo, PT 29:4 (1978) 196 - 200.
2. H. Koski, Nestekaasuräjähdy tuhoi hotellin Heinolan keskustassa - kolme kuoli, PT 29:4 (1978) 203 - 205. E. Jauros, Hotellin kaasuverkoston varolaitteet oli tehty toimintakelvottomiksi, PT 29:9 (1978) 464 - 466.
3. Raikan onnettomuuden tutkijalautakunnan tutkimusselostus, Komiteanmietintö 1978:51, Helsinki 1978, 85 s. + 3 s. liitt.
4. P. Harjanne, Sammutustyönjohtajan toimintaselostus paperikoneiden sekä paperivaraston palosta, PT 28:1 (1977) 10 - 16.
5. L. Santala, Suurpalo Olkiluodossa ydinvoimalan työmaalla, PT 27:2 (1976) 93 - 101.
6. J. Katajamäki, Lapuan räjähdysonnettomuus rauhanajan kohtalokkain maalla sattunut onnettomuus, PT 27:4 (1976) 236 - 245. Anon., Lapuan Patruunatehtaan räjähdysonnettomuuden tutkimusselostus valmis, PTT 8:2 (1978) 44 - 47.
7. P. Hiltunen, Uimaharjun sahapalosta noin 15 miljoonan markan palovahingot, PT 26:3 (1975) 144 - 148.
8. J. Alliniemi, Muovitehtaan raaka-ainesäiliö räjähti - palomies kuoli, kuudelle vammoja, PT 25:8 (1974) 360 - 362.
9. Anon. Miljoonapalojen kesä, PT 25:5 (1974), s. 248 - 251.
10. Anon. Miljoonapalojen kesä, PT 25:5 (1974), s. 248 - 251.
11. Anon. Miljoonapalojen kesä, PT 25:5 (1974), s. 248 - 251.
12. Anon. Miljoonapalojen kesä, PT 25:5 (1974), s. 248 - 251.
13. M. Yläupa, Öljysäiliöräjähdy Outokumpu Oy:n Olarin laitoksella, PT 24:1 (1973), s. 18 - 23, 36.
14. L. Jousimaa, Lautatarhapalo Tornion Röyttässä heinä- ja elokuun välisenä yönä 1971, PT 22:7 (1971) 324 - 329.
15. L. Syrjä, Teräsrakenteiden sortuminen autokorjaamon lisärakennuksen palossa Porissa, PTT 1:2 (1971) 68 - 72.
16. T. Heikkilä, Kertomus Kalajoen suurmetsäpalon vaiheista, PT 21:9 (1970) 452 - 456, 465 - 467.
17. Anon., Kuolema ja vakavia palovammoja kuumentuneen polttoöljytynnyrin repeytymisestä palopaikalla, PT 21:7 (1970) 348 - 352.
18. G. Lindqvist, Räjähdys Suomen Forsiitti-Dynamiitti Oy:n tehtaalla Bromarvissa, PT 20:8 (1969) 292 - 293.
19. P. Jaatinen, Oy Grahn Ltd:n vaneritehtaan palo Mikkeliissä 14.8. 1968, PT 19:9 (1968) 408 - 409.
20. P. Louhi, 5 ihmishuhria vaatinut laivapalo Oy Wärtsilä Ab:n Turun telakalla, PT 19:4 (1968) 172 - 174.
21. V. Toivonen, Kevytbensiinin lastauspaikalla suurtulipalo, PT 19:2 (1968) 74 - 76.
22. M. Yläupa, Hallipalo Westendissä, PT 18:4 (1967) 150 - 152.

Taulukko 4.4, jatkoa.

R	Vuosi	Päivämäärä	Paikkakunta	Palokohde	Syttymissy	Vahingot		
						K	L	A
1	1967		Imatra	lavaratalo	koiranpommi	0	0	
2	1966	22.4.	Lapinlahti	hoitolaitos	tupakointi	31	0	
3	1966	7.2.	Kouvola	muovitehdas	itsesytyminen	0	0	2,7
4	1966	21.5.	Vaajakoski	lastulevytehdas	itsesytyminen	2	9	4,3
5	1965	14.9.	Iisalmi	varasto		0	0	4
6	1965	16.3.	Rauma	muovitehdas	itsesytyminen	0	0	2,5
7	1965	18.3.	Helsinki	autolautta	hitsauskipinä	0	0	
8	1965	19.1.	Lahti	purusiilo	itsesytyminen	0	3	
9	1964	8.6.	Turku	rehusiilo	kipinä	0	1	
10	1964	12.6.	Turku	laivan konehuone	öljyvuoto liekkiin	4	3	
11	1964	24.2.	Kokkola	tehdashalli	hitsauskipinä	0	0	
12	1963	6.11.	Lahti	tehdashalli	hitsauskipinä	0	0	2,3
13	1963	9.1.	Oulu	tehdas	karkausreaktio	10	>10	11
14	1963	9.4.	Helsingin mtk	mylly		1	2	
15	1962	10.10.	Rauma	varasto	laitevika	0	0	250
16	1962	16.4.	Tornio	silta	kuuma esine	1	29	150
17	1962	22.3.	Kuopio	tehdas	ylikuumeneminen	0	0	
18	1961	23.3.	Mikkeli	sairaala	lämmityslaitte	0	0	
19	1960	12.7.	Helsinki	kirjapaino	itsesytyminen?	3	35	
20	1959	1.7.	Köyliö	vankila	tahallinen	16		
21	1959	30.6.	Kotka	varasto		0	0	74
22	1958	26.6.	Salo	varasto	itsesytyminen	1	13	

- J.V. Korhonen, Tavaratalon palo Imatralla, PT 18:1 /1967) 32 - 35.
- L. Santala, Lapinlahden kunnalliskodin mielisairasosasto ja sen palo 22-23.4.1966, PT 17:4 (1966) 166 - 171.
- E.E. Lolkala, Kymen Vanu Oy:n vaahtomuovitehtaan palo Kouvola, PT 17:2 (1966) 84 - 88.
- L. Santala, SOK:n Vaajakosken Tehtaiden lastulevytehtaan suurpalo 21.5.1966, PT 17:6 (1966) 278 - 284.
- A. Laatikainen, Räjähdyksessä 14.9.1965, PT 16:8 (1965) 400 - 402.
- K. Hyrsky, Superlontteen palo Raumalla, PT 16:5 (1965) 243 - 245.
- O. Lyly, Autolautta Finnansan palo, PT 16:3 (1965) 124 - 129.
- R. Olanterä, Räjähdyksiä purusiilossa, PT 16:1 (1965) 24-25.
- P. Turjas, Kaksi tuhoisaa räjähdyspaloa Turussa viiden päivän sisällä, PT 15:6 (1964) 302 - 305.
- P. Turjas, Kaksi tuhoisaa räjähdyspaloa Turussa viiden päivän sisällä, PT 15:6 (1964) 302 - 305.
- P.K. Hallio, Runsaasti kiinnostavia yksityiskohtia kalsiumkloriditehtaan suurpalossa Kokkolassa, PT 15:3 (1964) 124 - 129.
- P. Pesonen, Suurpalo Upo Oy:n uudessa tehdas- ja varastorakennuksessa, PT 14:10 (1963) 538 - 540.
- O. Ollila, Typpi Oy:n ammoniumnitraattiräjähdyksessä ja muutamia siihen liittyviä selvittelyjä, PT 14:3 (1963) 142 - 144.
- Y. Salkola, Kun suolavarastokin voi räjähtää ..., PT 14:3 (1963) 156 - 157.
- K. Hyrsky, Nestekaasutrukin aiheuttama suurpalo Rauman satamassa, PT 13:7 (1962) 334 - 337.
- L. Jousimaa, Sammutusmiehen hengen vaatinut siltapalo Torniossa, PT 13:4 (1962) 178 - 181.
- K. Ihalainen ja J. Sirola, Suurpalo sprinklatussa tehdaslaitoksessa 22.3.62, PT 13:3 (1962) 116 - 118.
- V. Häkkinen, Mikkelin lääninsairaalan uudisrakennuksen palo, PT 12:4 (1961) 190 - 193.
- A. Hame, Kolmen palomiehen surma Tilgmann Oy:n kirjapainotalon palossa Helsingissä, PT 11:5 (1960) 240 - 244.
- I. Juvakoski, 16 vankia menehtyi liekkeihin Köyliön varavankilan palossa, PT 10:5 (1959) 227 - 230.
- E. Jauros, Kotkan sataman suurpalo, PT 10:5 (1959) 233 - 236.
- Anon. Palomiehen hengen vaatinut räjähdysnettomuus Salon Kuivaamo Oy:n heinäjauhotehtaan palossa, PT 9:6 (1958) 284.

Taulukko 4.4, jatkoa.

R	Vuosi	Päivämäärä	Paikkakunta	Palokohde	Syttymissyy	Vahingot		
						K	L	A
1	1957	23.3.	Helsingin mk.	lentokonehalli	kuuma laite	0	0	
2	1957	20.3.	Toivakka	varasto		0	2?	
3	1956	29.9.	Kauhajoki	kirkko	itsesytyminen			
4	1956	20.6.	Eno?	saha	laitevika	0	0	200
5	1955	11.10.	Tohmajärvi	tiilitehdas	sähköjohdot	0	0	46
6	1954	26.11.	Kangasala	lastenkoti	tuliikkuleikki?	9	0	
7	1954	20.11.	Heinävesi	kunnalliskoti	savupiippu	6	0	
8	1954	22.8.	Oulu	talotehdas		0	0	73
9	1952	26.4.	Helsinki	tehdashalli	itsesytyminen	0	0	30
10	1950	14.6.	Helsinki	rautatieasema		0	7	30
11	1950	6.1.	Kerimäki	kunnalliskoti	tuliikki	9	0	

1. H. Hindström, Tulipalo Seutulan lentokentäsuojoissa maaliskuussa 1957, PT 9:2 (1958) 63.
2. V. Kuulusa, Toivakan Viisarinmäen räjähdysonnettomuus, PT 8:5 (1957) 248 - 249.
3. P. Harjula, Kauhajoen 136-vuotiaan puukirkon palo, PT 7:6 (1956) 276 - 277.
4. Z. Walmar, Kevätniemen sahan palosta yli 200 milj. markan vahingot, PT 7:5 (1956) 175 - 178
5. T. Joki, Tiilitehtaan palo Tohmajärvellä, PT 6:7 (1955) 380 - 381.
6. EVN, Kangasalan lastenkodin palossa jäi 9 lasta liekkimeren saaliiksi, PT 5:8 (1954) 318 - 319.
7. P.N. Soini, Kuusi hoidokkia paloi Heinäveden kunnalliskodin mielisairasosaston rakennuksen mukana, PT 5:8 (1954) 319 - 320.
8. E. Puusti, Talotehdas paloi, PT 5:6 (1954) 241 - 244.
9. E. Karhu, Vernissaisen trasselin itsesytyttämisestä 30 milj. markan vahingot, PT 3:2 (1952) 60 - 61.
10. H. Forsberg, Helsingin rautatieaseman palo, PT 1:6 (1950) 192 - 193.
11. Soini, Yhdeksän hoidokkia paloi Kerimäen kunnalliskodin palossa, PT 1:3-4 (1950) 95 - 97.

5. PALONSYYN SELVITTÄMISEN KIRJALLISUUTTA

Tässä luvussa esitetään projektissa "Uudet tutkimusmenetelmät palonsyöntutkinnassa" tehdyn kirjallisuushaun aikana löydetty palon syyn selvittämiseen liittyvä aineisto.

5.1 KIRJAT

A pocket guide to arson and fire investigation. Moreton-in-Marsh: Factory Mutual International and The Fire Service College, 1994. 56 s.

Actual state of fire 1994 in Tokyo. Tokyo: Tokyo Fire Department. 429 s. (japaninkielinen).

Andersson, H. Anlagda bränders omfattning. Motiv och påverkande faktorer. Stockholm, Sverige: Institutionen för kriminologi vid Stockholms Universitet. 1995. 211 s.

Anlagd Brand - Insatser mot ett samhällsproblem. Stockholm, Sverige: Svenska Brandförsvarsföreningen. 1993. 148 s.

Annual fire report 1992. Disaster Section, Fire Defence Agency, Japan. 1994. 241 s. (japaninkielinen).

Arson, some problems and solutions. Boston: National Fire Protection Association (NFPA), 1976. 146 s.

ATF Arson Investigative Guide. Washington, DC: Bureau of Alcohol, Tobacco and Firearms, 1987. 152 s.

Barracato, J. Burning, A Guide to Fire Investigation. Hartford CT: Aetna Casualty & Surety Co., 1986.

Basic Tools and Resources for Fire Investigators: A Handbook. Federal Emergency Management Agency, United States Fire Administration, 1992. 45 s.

Battle, B., Weston, P.B. Arson Detection and Investigation. Arco Publishing Co., New York, 1978.

Brannigan, F.L., Bright, R.G., Jason, N.H. Fire Investigation Handbook. NBS handbook 134. Washington, DC: National Bureau of Standards, 1980. 187 s.

Cardoulis, J. N. The Art and Science of Fire Investigation. St. John's, Newfoundland: Breakwater Books, 1990. 264 s.

Carroll, J.R. Physical and Technical Aspects of Fire and Arson Investigations. Springfield, Ill: C.C. Thomas Publications, 1979. 455 s.

- Cole, L.S. The Investigation of Motor Vehicle Fires, Third Edition. Novato, CA: Lee Books, 1992. 183 s.
- Cooke, R.A. Ide, R.H. Principles of Fire Investigation. Leicester: The Institute of Fire Engineers, 1985. 405 s.
- DeHaan, J.D. Kirk's Fire investigation, 3d Ed. Englewood Cliffs, NJ: Brady, 1991. 416 s.
- Dennett, M.F. Fire Investigation. Oxford: Pergamon Press Ltd, 1980. 104 s.
- Fire Cause Determination. International Fire Service Training Association. Stillwater, Oklahoma: Fire Protection Publications, Oklahoma State University, 1982. 159 s.
- Fire/Arson Investigation Training Resource Catalog. Federal Emergency Management Agency, 1993. 247 s.
- Frei-Sulzer, M., Suter, A. Leitfaden zur Bearbeitung von Brandursachen und Explosionen. Kriminilastik Verlag, Hamburg, 1971.
- Fujita, S. 1994. Vademecum of Fire Identification, Tokyo Fire Department, 350 s (japaninkielinen).
- Håndbok i brannetterforskning. Oslo: Norsk Brannvern Forening, 1988. 58 s.
- Hartigan, N. F. Illinois Attorney General Arson Training and Prosecution Manual. Chicago, Ill: Clausen Miller Gorman Cafrey and Witous, P.C. Chicago. 501 s.
- Hobson, C. B. Fire Investigation: A New Concept. Springfield, Ill: Charles C. Thomas Publisher, 1991. 371 s.
- Kawaguchi, S. 1987. Technical Handbook of Fire Investigation, Foundation Tokyo Bosaishi Dokyokai, Vol. 3, 866 s. (japaninkielinen).
- Kawakuchi, S. 1991 Fire Investigation, Tokyo Fire Department, 581 s. (japaninkielinen).
- Kennedy, J., Kennedy P.M. Fires and explosions, determining cause and origin. Chicago, Ill: Investigations Institute, 1985. 1505 s.
- Koyama, T. 1986. Fire Investigation Handbook: Cigarettes, gas heaters, oil heaters, car fires and other causes, Tokyo Fire Department, Vol. 2, 626 s. (japaninkielinen).
- Kuchta, J.M. Investigation of Fire and Explosion Accidents in the Chemical, Mining and Fuel-Related Industries - A Manual. Pittsburgh, PA: U.S. Bureau of Mines, 1985. 84 s. (U.S. Bureau of Mines, Bulletin 680)
- Manual of Aircraft Accident Investigation: Doc. 6920-AN/855/4, 4th Ed. Montreal, Quebec: International Civil Aviation Organization, 1970.

- NFPA 1033. Professional Qualifications for Fire Investigator, 1993 Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 1993. 15 s.
- NFPA 422. Guide for Aircraft Accident Response, 1994 Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 1994. 30 s.
- NFPA 907M. Manual for the Determination of Electrical Fire Causes, 1988 Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 1988. 38 s.
- NFPA 921. Guide for Fire and Explosion Investigations, 1992 Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 1992. 120 s.
- NFPA 921. Guide for Fire and Explosion Investigations, 1995 Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 1995. 162 s.
- O'Connor, J.J. Practical Fire and Arson Investigation. Boca Raton, FL: CRC Press, Inc. 1993. 314 s.
- Patton, A.J. Fire Litigation Sourcebook, Second Edition, Volume 1. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc, 1994. 445 s.
- Patton, A.J. Fire Litigation Sourcebook, Second Edition, Volume 2. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc, 1994. 507 s.
- Phillips, C.C., McFadden, D.A. Investigating the Fireground. Saddle Brook, NJ: Fire Engineering Books and Videos, 1982. 280 s.
- Räsänen, P. Mielentilatutkittu murhapolttaja. Oulu: Oulun yliopisto. 70 s. + liitt. 45 s. (Acta Universitatis Ouluensis Medica D 340.)
- Roblee, C.L., McKechnie, A.J.: The Investigation of Fires, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1981, 2nd Ed. 1988.
- Schäfer, H. (Red.) Brandursache Elektrizität. Bremen: Kriminalistische Studiengemeinschaft e.V, 1986. 191 s.
- Schmidt Pedersen, K., Lundberg, S. Branner; systematisering og analyse. Delrapport 1. Trondheim: Norges branntekniske laboratorium, 1980. 140 s. (Norges branntekniske laboratorium, rapport STF25 A80001)
- Swab, S.E. Incendiary Fires. A Reference Manual for Fire Investigators. Bowie, MD: R. J. Brady Co., 1983. 168 s.
- Walls, H.J. Forensic Science, An Introduction to Scientific Crime Detection, Second Edition. Praeger Publishers, New York, Washington 1974.
- Weston, P.B., Wells, K.M. Criminal Investigation: Basic Perspectives - 6th Edition. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall Career & Technology, 1994. 446 s.
- White book on fire service in Japan. Fire Defence Agency, Japan. 1988. 142 s.

Yallop, H.J. Explosion Investigation. Harrogate: The Forensic Science Society, 1980. 276 s.

5.2 RAPORTTISARJA- JA VASTAAVAT JULKAISUT

Andersson, M., Kopp, I., Kylsäter, P. Brandorsaksundersökningar och brandstatistik. Linköping: SKL - Kriminaltekniska laboratoriet, 1994. 22 s. (RPS Forskning 1994:1)

Barracato, J.S. Fire... is it arson? Hartford, Connecticut: Ætna Casualty and Surety Company, 1979. 43 s.

Carlsson, G., Jonson, S., Kopp, I., Wistedt, I. Conserving samples of fire debris suspected of containing accelerants. Linköping: SKL - Kriminaltekniska laboratoriet, 1993. 23 s. (SKL - Kriminaltekniska laboratoriet, Report 28.)

Carlsson, G., Wistedt, I. Analysis of arson accelerant residues by ATD 400. Linköping: SKL - Kriminaltekniska laboratoriet, 1993. 12 s. (SKL - Kriminaltekniska laboratoriet, Report 26.)

Curso De Investigacion de Siniestros de Incendio. Itsemap Fuego, Madrid 1994.

Electricity and fire. The dangers and remedies. London: Fire Protection Association, 1979. 19 s.

Erlandsson, R., Strand, G. Elektrisk brandanstifan studerad med fysikaliska analysmetoder. Linköping: SKL - Kriminaltekniska laboratoriet, 1983. 14 s. (SKL - Kriminaltekniska laboratoriet, Rapport 13.)

Glass. Teoksessa: Gallo, J.L., Field, K.S. (toim.) Final report "Criminalistics methods of analysis feasibility study". Appendix B: Vol. 2: A compendium of forensic science methods. Colorado Springs, Colorado: The Forensic Sciences Foundation, Inc., 1980., S. 234 - 268.

Heikkonen, P. Tuhopoltot Suomessa 1990 - 93. Helsinki: Palotutkimusraati - Brandforskningsrådet ry., 1994. 71 s.

Jonson, S. Electrical causes of fires with special emphasis on primary and secondary damages: A review of the literature. Linköping: SKL - Kriminaltekniska laboratoriet, 1993. 17 s. (SKL - Kriminaltekniska laboratoriet, Report 29.)

Klippberg, A. Elektriska brandorsaker - en förstudie. Stockholm: Svenska Brandförsvärsföreningen, 1994. 22 s.

Mustonen, E. Sähköpalojen tilastointimenettely ja palonsyytutkinta. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, sähkölaitos- ja valaistustekniikan laboratorio, 1986. 70 s.

Robertsson, A., Karlsson, S.-E., Strand, G., Nilsson, G. Smältskador på elektriska ledare. Linköping: SKL - Kriminaltekniska laboratoriet, 1988. 35 s. (SKL - Kriminaltekniska laboratoriet, Rapport 20.)

Schadenbilder aktuell. Bayerischen Versicherungskammer München, Bayerische Landesbrandversicherungsanstalt. Vuosilta 1985 - 1993.

5.3 LEHTIARTIKKELIT

5.3.1 Sähköiset syyt

Anderson, R.N. Surface analysis of electrical arc residues in fire investigation. *Journal of Forensic Sciences*, 1989. Vol. 34, nro 3, 633-637.

Anderson, R.N., Brosz, H.G., Posey, E., Schefelbein, B. Recent advances in Auger analysis of electrical arc residues. Teoksessa: Jacob, B., Bonte, W. *Advances in forensic sciences*. Vol. 3, Forensic criminalistics 1. 13th Meeting of International Association of Forensic Sciences, Düsseldorf, 22-28 August 1993. Berlin: Verlag Dr. Köster. S. 162-166.

Anderson, R.N., Wolfe, T.A. Scientific examination of electrical arc residues to determine fire cause. *Fire and Arson Investigator*, 1992. Vol 42., nro 3, 58-59.

Beland, B. Arcing phenomenon as related to fire investigation. *Fire Technology*, 1981. Vol 17, nro 3, 189-201.

Beland, B. Comments on fire investigation procedures. *Journal of Forensic Sciences*, 1984. Vol. 29, nro 1, 190-197.

Beland, B. Considerations on arcing as a fire cause. *Fire Technology*, 1982. Vol 18, nro 2, 188-202.

Beland, B. Electrical damages - cause or consequence? *Journal of Forensic Sciences* 1984. Vol. 29, nro 3, 747-761.

Beland, B. Examination of electrical conductors following a fire. *Fire Technology*, 1980. Vol 16, nro 4, 252-258.

Beland, B. Heating of Damaged Conductors. *Fire Technology*, 1982. Vol 18, nro 3, 229-236.

Beland, B., Roy, C., Tremblay, M. Copper-Aluminum Interaction in Fire Environments. *Fire Technology*, 1983. Vol 19, nro 1, 22-30.

Beland, B., Saucier, D. Fire Damage to Aluminum Wired Receptacles. *Fire Technology*, 1986. Vol 22, nro 4, 341-345.

Delplace, M., Vos, E. Electric short circuits help the investigator determine where the fire started. *Fire Technology*, 1983. Vol 19, nro 3, 185-191.

Eaton, T.E. Electric services and building fires. *Fire Technology*, 1992. Vol 28, nro 1, 70-86.

Erlandsson, R., Strand, G. An investigation of physical characteristics indicating primary or secondary electrical damage. *Fire Safety Journal*, 1984/1985. Vol. 8, s. 97-103.

Ettling, B.V. Arc marks and gouges in wires and heating at gouges. *Fire Technology*, 1981. Vol. 17, nro 1, 61-68.

Ettling, B.V. Glowing Connections. *Fire Technology*, 1982. Vol. 18, nro 4, 344-349.

Fechtman, G.J. Fire hazard assessment of electrical equipment. Teoksessa IEC ACOS workshop II, April 11-12, 1988. s. 1-10.

Gray, D.A., Drysdale, D.D., Lewis, F.A.S. Identification of electrical sources of ignition in fires. *Fire Safety Journal*, 1983. Vol. 6, nro 2, 147-150.

Weintraub, L., Jimenez, L.M. Open electrical neutral hazards and pyrophoric carbonization phenomenon. *Fire and Arson Investigator*, 1993. Vol 44, nro 2, s. 11 - 13.

5.3.2 Muut aiheet

Anon. Approaching arson investigations armed with facts, science and a computer. *Firehouse*, February 1994. s. 50-52.

Beering, P.S. High-tech hunting and gathering: using computers in fire investigations. *Firehouse*, February 1992. s. 52-54.

DeHaan, J.D., Bonarius, K. Pyrolysis products of structure fires. *Journal of the Forensic Science Society* 1988. Vol. 28, 299-309.

Donahue, M.L., Campbell, C.A. Investigation of motor vehicle fires. *Firehouse*, August 1990. s. 59-60.

Eisner, H. Arson hits city as cutbacks decrease fire protection. *Firehouse*, June 1994. s. 32-35, 116.

Eisner, H. Fireground tactics-investigating odors of smoke. *Firehouse*, September 1994. s. 16-18.

Forestal, R. Use of ultraviolet light in fire/arson, bomb and environmental investigation. *Firehouse*, September 1994. s. 48-50.

Fulton, B.A., Meloen, C.E. Quick test for accelerants after steam distillation. *Journal of Forensic Sciences* 1986. Vol. 31, nro 3, 1086-1088.

Goss, J. Forensic scientist's experiments have revealed fire hazard of brake fluids. *Fire*, 1992. Vol. 85, nro 1044, s. 8.

Harwell, J.A. On the job - Georgia. The danger of steel trusses. *Firehouse*, September 1994. s. 52-55.

Hellmiss, G., Schwanebeck, W. Aspects of the investigation of the chemical processes of self-heating as a fire cause by means of quantitative thermal analysis. *Journal of Forensic Sciences* 1984. Vol. 30, nro 2, 535-540.

Higgins, S.E. Complex arson - a speciality of ATF labs. *Firehouse*, September 1993. s. 50-51.

Hoffman, J. Investigating vehicle fires. *Firehouse*, March 1992. s. 22-25.

Jones, A. Fire investigation: new approach will be 'the key to the future'. *Fire*, 1994. Vol. 87, nro 1068, s. 6-7.

Kirkbride, K.P., Sook Miun Yap, Andrews, S., Pigou, P.E., Klass, G., Dinan, A.C. Peddie, F.L. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons: implications for arson residue analysis. *Journal of Forensic Sciences* 1992. Vol. 37, nro 6, s. 1585-1599.

Lentini, J.J., Smith, D.M. Henderson, R.W. Baseline characteristics of residential structures which have burned to completion: The Oakland experience. *Fire Technology*, 1992. Vol 28, nro 3, s. 195-214.

Levinson, D.W. Copper metallurgy as a diagnostic tool for analysis of the origin of building fires. *Fire Technology*, 1977. Vol. 13, nro 3, s. 211-222.

Mammone, M. Determining the point of origin. *Firehouse*, 1994. Vol. 19, nro 9, 35-40.

Midkiff, C.R. Is it a petroleum product? How do you know? *Journal of Forensic Sciences* 1986. Vol. 31, nro 1, s. 231-234.

Mizumoto, M., Iyata, Y., Yamaguchi, T. Fire accident of downlight for incandescent lamp. Kumamoto: Kumamoto Prefecture Police H.Q., Forensic Science Laboratory.

Mniszewski, K.R. The Pepcon Plant fire/explosion. A rare opportunity in fire/explosion investigation. *J. of Fire Prot. Engr.*, 1994. Vol. 6, nro 2, s. 63-78.

O'Loughlin, J.R., Yokomoto, C.F. Computation of one-dimensional spread of a leaking flammable gas. *Fire Technology*, 1989. Vol. 25, nro 4, s. 308-316.

Rabinkov, V.A. The distribution of flammable gas concentrations in rooms. *Fire Safety Journal*, 1988. Vol. 13, nro 2&3, s. 211-217.

Smith, F.P. Concrete spalling: controlled fire tests and review. *Journal of the Forensic Science Society* 1991. Vol. 31, nro 1, s. 67-75.

Smith, S.P. High temperature accelerant fires. Firehouse, August 1991. S. 41-45.

Stambaugh, H. Fire investigation management- concerns for the 1990s. Firehouse, August 1990. S. 66-67, 95.

Tobin, W.A., Monson, K.L. Collapsed spring observations in arson investigations: a critical metallurgical evaluation. Fire Technology, 1989. Vol. 25, nro 4, s. 317-335.

Tontarski, R.E. Using absorbents to collect hydrocarbon accelerants from concrete. Journal of Forensic Sciences 1985. Vol. 30, nro 4, s. 1230-1232

Trimpe, M.A. Turpentine in arson analysis. Journal of Forensic Sciences 1991. Vol. 36, nro 4, s. 1059-1073.

Whitstine, L. Four legs, a tail and a badge...canines in the fire service. Firehouse, August 1992. s. 44-45.

5.4 TUTKITTUJA TAPAUKSIA

Grant, C.C., Klem, T.J. Summary fire investigation report, Kader Industrial (Thailand) Co. Ltd. Nakhon Pathom Province, Thailand, May 10, 1993. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 12 s. + liitt. 2 s.

Hodson, G.B., Baker, D.E., Arhart, R.W., Bodrero, T.A. Hill AFB bunker 1825 fire investigation. Teoksessa 1990 JANNAF safety & environmental protection subcommittee meeting, Livermore, California, 18-21 June 1990. Laurel, MD.: Chemical Propulsion Information Agency, CPIA Publication 543. S. 147 - 155.

Isner, M.S. Summary fire investigation report, two Stadium fires, Atlanta, Georgia, July 20, 1993 and Irving, Texas, October 13, 1993. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 15 s. + liitt. 2 s.

Isner, M.S. Fire investigation report, food processing plant fire, Yuma, Arizona, November 12, 1992. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 11 s. + liitt. 1 s.

Isner, M.S. Fire investigation report, Telephone exchange fire, Los Angeles, California, March 15, 1994. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 31 s. + liitt. 6 s.

Isner, M.S. Summary fire investigation report, Church fire, St. Louis, Missouri, April 28, 1994. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 9 s. + liitt. 4 s.

Isner, M.S. Summary fire investigation report, Hospital fire, Brooklyn, New York, September 1, 1993. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 13 s. + liitt. 1 s.

Isner, M.S. Summary fire investigation report, Hospital fire, sprinkler success, Weymouth, Massachusetts, January 24, 1993. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 4 s.

Isner, M.S. Summary fire investigation report, Nursing Home fire, Sprinkler Success, Ashland, Kentucky, June 2, 1993. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 4 s.

Isner, M.S. Summary fire investigation report, Paxton Hotel fire, Chicago Illinois, March 16, 1993. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 11 s. + liitt. 1 s.

Isner, M.S., Klem, T.J. Fire investigation report, World Trade Center explosion and fire, New York, New York, February 26, 1993. National Fire Protection Association. 59 s. + liitt. 14 s.

Nelson, H.E, King Mon Tu. Engineering analysis of the fire development in the Hillhaven Nursing Home fire, October 5, 1989. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1991. 51 s. (NISTIR 4665).

Nelson, H.E. An engineering analysis of the early stages of the fire development _ the fire at the Dupont Plaza Hotel and Casino - December 31, 1986. Gaithersburg: National Bureau of Standards, 1987. 62 s. + liitt. 51 s. (NBSIR 87-3560).

Nelson, H.E. Fire growth analysis of the fire of March 20, 1990, Pulaski Building, 20 Massachusetts Avenue, N.W., Washington, DC. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1994. 48 s. (NISTIR 4489).

Quintiere, J.G. Fire growth analysis, Waldbaum's Supermarket fire, 2892 Ocean Avenue, Brooklyn, NY., August 2, 1978. Käsikirjoitus, 1994.

Unites States Fire Administration, Technical report series

Chubb, M. High temperature accelerant (HTA) arson fires. Emmitsburg, Maryland: Federal Emergency Management Agency. 24 s. + liitt. 12 s. (United States Fire Administration, Technical report series, Report 065).

David, J. Seven-fatality christmas tree fire, Canton, Michigan (December 22, 1990). Emmitsburg, Maryland: Federal Emergency Management Agency. 9 s. + liitt. 11 s. (Unites States Fire Administration, Technical report series, Report 046).

Kirby, R.E. Major propane gas explosion and fire, Perryville, Maryland (July 6, 1991). Emmitsburg, Maryland: Federal Emergency Management Agency. 14 s. + liitt. 44 s. (United States Fire Administration, Technical report series, Report 053).

Routley, J.G. Four firefighters killed, trapped by floor collapse, Brackenridge, Pennsylvania (December 20, 1991). Emmitsburg, Maryland: Federal Emergency Management Agency. 25 s. + liitt. 30 s. (United States Fire Administration, Technical report series, Report 061).

Routley, J.G. Massive leak of liquified chlorine gas, Henderson, Nevada (May 6, 1991). Emmitsburg, Maryland: Federal Emergency Management Agency. 13 s. + liitt. 11 s. (United States Fire Administration, Technical report series, Report 052).

Stambaugh, H. The Grems case: How an arson case was solved and prosecuted in Colorado. Emmitsburg, Maryland: Federal Emergency Management Agency. 14 s. + liitt. 1 s. (United States Fire Administration, Technical report series, Report 047).

Ministry of the Solicitor General, Office of the Fire Marshal, Ontario, Canada, Fire Investigation Reports

Goodyear, D. Extendicare Starwood fire. Napean, Ontario, August 14, 1989. Ontario: Ministry of the Solicitor General, Office of the Fire Marshal. 1991. 14 s.

Silvestri, B. Rupert Hotel fire. 182 Parliament Street, Toronto, Ontario, December 23, 1989. Ontario: Ministry of the Solicitor General, Office of the Fire Marshal. 1991. 14 s.+ liitt. 2 s.

Kassabian, A. Sauna fires. 225 Major MacKenzie Drive, Richmond Hill, Ontario, 13 April, 1990 & 7805 Bayview Avenue, Markham, Ontario, 12 July, 1990. Ontario: Ministry of the Solicitor General, Office of the Fire Marshal. 1991. 12 s. + liitt. 12 s.

Marinoff, E. Fire caused by lightning. Sandwich South Township, September 7, 1990. Ontario: Ministry of the Solicitor General, Office of the Fire Marshal. 1993. 5 s.

Choudry, Q. Examination of spontaneous combustion. Fire at Seneca Manufacturing Ltd., Niagara Stone Road, Niagara, Ontario, February 14, 1991. Ontario: Ministry of the Solicitor General, Office of the Fire Marshal. 1991. 4 s.

Marinoff, E. Van fire. Mississauga, Ontario, March 8, 1991. Ontario: Ministry of the Solicitor General, Office of the Fire Marshal. 1991. 6 s.

McNeil, M. Fatal dwelling fire. Wellington County, Ontario, 8 August, 1991. Ontario: Ministry of the Solicitor General, Office of the Fire Marshal. 1993. 14 s. + liitt. 3 s.

Choudry, Q. Chimney fire. 34 Hill County Drive, Stouffville, Ontario, March 5, 1992. Ontario: Ministry of the Solicitor General, Office of the Fire Marshal. 1993. 12 s.

Goodyear, D. 29 Buckingham Drive. Stratford, Ontario, May 8, 1992. Ontario: Ministry of the Solicitor General, Office of the Fire Marshal. 1993. 11 s + liitt. 2 s.

McGlashan, J., Goodyear, D. Fire fighter fatality, Alcatel Canada Inc. (Sel Division). 101 Valleybrook Drive, North York, Ontario, Canada, 2 June, 1992. Ontario: Ministry of the Solicitor General, Office of the Fire Marshal. 1993. 28 s. + liitt. 56 s.

Kassabian, A. Electrical baseboard heaters. 1993. Ontario: Ministry of the Solicitor General, Office of the Fire Marshal. 1993. 10 s. + liitt. 13 s.

LÄHDELUETTELO

- Alho, R. 1986. Turvallisuusinvestoinnit kannattavat - Hanasaaren voimalapalon sammutus hyvä esimerkki, *Palontorjunta*, vol. 37, nro 6, s. 364 - 365.
- Ambrose, D. & Ambrose B.A. 1961. *Gas chromatography*. London: George Newnes Ltd. 220 s.
- Anon. 1966. 1960-luvun suurpalotilastoa. *Palontorjunta*, vol. 17, nro 6, s. 286 - 287.
- Anderson, R.N. 1989. Surface analysis of electrical arc residues in fire investigation. *Journal of Forensic Sciences*, vol. 34, nro 3, 633 - 637.
- Anderson, R.N., Brosz, H.G., Posey, E. & Schefelbein, B. 1993. Recent advances in Auger analysis of electrical arc residues. Teoksessa: Jacob, B., Bonte, W. *Advances in forensic sciences. Vol. 3, Forensic criminalistics 1. 13th Meeting of International Association of Forensic Sciences, Düsseldorf, 22-28 August 1993*. Berlin: Verlag Dr. Köster. S. 162 - 166.
- Anderson, R.N. & Wolfe, T.A. 1992. Scientific examination of electrical arc residues to determine fire cause. *Fire and Arson Investigator*, vol. 42, nro 3, s. 58 - 59.
- Bartknecht, W. 1987. *Staubexplosionen*. Berlin: Springer. 267 s.
- Bayer, E. 1961. *Gas chromatography*. Amsterdam: Elsevier. 240 s.
- 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.
- Beland, B. 1984a. Comments on fire investigation procedures. *Journal of Forensic Science*, vol. 29, nro 1, s. 190 - 197.
- Beland, B. 1984b. Electrical damages - cause or consequence? *Journal of Forensic Sciences*, vol. 29, nro 3, s. 747 - 761.
- Beland, B., Roy, C. & Tremblay, M. 1983. Copper-aluminum interaction in fire environments. *Fire Technology*, vol. 19, nro 1, s. 22 - 30.

- Beland, B. & Saucier, D. 1986. Fire damage to aluminum wired receptacles. *Fire Technology*, vol. 22, nro 4, s. 341 - 345.
- Crossland, B. 1992. The King's Cross Underground fire and the setting up of the investigation. *Fire Safety Journal*, vol. 18, nro 1, s. 3 - 11.
- 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.
- Dorn, E. 1880. Über die Fortführung der Electricität durch strömendes Wasser in Röhren und verwandte Erscheinungen. *Annalen der Physik und Chemie*, vol. 245, nro 4, s. 513 - 552.
- Drysdale, D.D., Macmillan, A.J.R., & Shilitto, D. 1992. The King's Cross fire: experimental verification of the 'trench effect'. *Fire Safety Journal*, vol. 18, nro 1, s. 75 - 82.
- Eckhoff, R.K. 1991. *Dust explosions in the process industries*. Oxford: Butterworth - Heinemann. 599 s.
- Eloranta, E. 1989. Tulipalon numeerinen simulointi - esimerkkinä Järvenpään huoneistopalo. *Palontorjuntatekniikka*, vol. 19, nro 2, s. 6 - 9.
- Erlandsson, R. & Strand, G. 1983. Elektrisk brandanstiftan studerad med fysikaliska analysmetoder. Linköping: SKL - Kriminaltekniska laboratoriet. 14 s. (SKL - Kriminaltekniska laboratoriet, Rapport 13.)
- Erlandsson, R. & Strand, G. 1984/1985. An investigation of physical characteristics indicating primary or secondary electrical damage. *Fire Safety Journal*, vol. 8, nro 2, s. 97 - 103.
- Ettling, B.V. 1981. Arc marks and gouges in wires and heating at gouges. *Fire Technology*, vol. 17, nro 1, s. 61 - 68.
- Ettling, B.V. 1982. Glowing connections. *Fire Technology*, vol. 18, nro 4, s. 344 - 349.
- Field, P. 1982. *Dust explosions*. Amsterdam: Elsevier. 243 s.
- Goodyear, D. 1993. 29 Buckingham Drive. Stratford, Ontario, May 8, 1992. Ontario: Ministry of the Solicitor General, Office of the Fire Marshal. 11 s. + liitt. 2 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, NBS, Gaithersburg, MD, 40 s.

- Heinolan nestekaasuräjähdysonnettomuuden tutkijalautakunnan selostus, 1978. Helsinki: Kauppa- ja teollisuusministeriö. 21 s. + liitt. 27 s.
- Honkala, M. 1993. Myrkylliset palamistuotteet uhkasivat sammuttajien ja asukkaisen terveyttä. Pelastustieto, vol. 44, nro 9, s. 16 - 18.
- Howells, P. 1993. Electrostatic hazards of foam blanketing operations. International conference on health, safety and loss prevention in the oil, chemical and process industries, Singapore, 19-21.2.1993, Proceedings. Oxford: Butterworth-Heinemann. 11 s.
- Hulmi, V. Kevytmetallit. Teoksessa: Tekniikan käsikirja, osa 2. 8. painos. Jyväskylä: Gummerus. S. 325 - 348.
- Hästbacka, K. 1980. Kaasukromatografia. Teoksessa: Kivalo, P. (toim.) Instrumenttianalytiikka 3. Jyväskylä: Gummerus. S. 75 - 182.
- 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.)
- Jotuni, P. Teknillisten aineiden ominaisuuksista. Teoksessa: Tekniikan käsikirja, osa 2. 8. painos. Jyväskylä: Gummerus. S. 207 - 226.
- Karlsson, J. 1989. Säiliöpalosta 30 miljoonan vahingot Nesteen Sköldvikin jalostamolla. Palontorjunta, vol. 40, nro 3, s. 14 - 17.
- Katajamäki, J. 1997. Lahden kerrostalopalo. Pelastustieto, vol. 48, nro 1, s. 8 - 19.
- Katajamäki, J. 1989. Puutteellinen varustus merkittävin osasyypalomiehen kuolemaan ja toisen loukkaantumiseen. Palontorjunta, vol. 40, nro 1, s. 12 - 24.
- Keski-Rahkonen, O. 1994. Pölyräjähdysten peruskäsitteet ja pölyjen räjähdysvaaran testaus, AEL-INSKO R3259J/94 II, Suojelutekniikan teemapäivät 22.-24.-11.1994, AEL-INSKO -koulutus, Helsinki, 22 s.
- Keski-Rahkonen, O. 1992. Effect of the substrate on the results of the fire tests of thin layers of floor, wall, and ceiling coverings. Espoo: Technical Research Centre of Finland. 37 s. + liitt. 7 s. (VTT Publications 111).
- Keski-Rahkonen, O., Björkman J. & Farin, J. 1997. Derating of cables at high temperatures, Espoo: Technical Research Centre of Finland. 57 s + liitt. 2 s. (VTT Publications 302).
- Klem, T.J. 1987. 97 die in arson fire at Dupont Plaza Hotel. Fire Journal, vol. 81, nro 3, s. 74 - 83, 104 - 105.
- Klinkenberg, A. & van der Minne, J.L. 1958. Electrostatics in the petroleum industry. The prevention of explosion hazards. Amsterdam: Elsevier Publishing Company. 191 s.

- Kontio, J. 1986. Miljoonapalot Teollisuusvakuutuksen kannassa viimeisen kymmenen vuoden aikana. Teollisuusvakuutus nro 2, s. 16 - 19, 31.
- Kuusankosken palokuolemien tutkijalautakunta 1993. Kuljetinjärjestelmän palo Kuusankoskella 8.5.1993, Sisäasiainministeriö, 32 s + liitt. 18 s.
- Kylänpää, V. 1986. Hanasaaren voimalapalo - varsin vaativa sammutustyö, Palontorjunta, vol. 37, nro 6, s. 367 - 369.
- Levinson, D.W. 1977. Copper metallurgy as a diagnostic tool for analysis of the origin of building fires. Fire Technology, vol. 13, nro 3, s. 211 - 222.
- Liebman, S.A. & Levy, E.J. (eds.). 1985. Pyrolysis and GC in polymer analysis. New York: Marcel Dekker. 557 p.
- Mangs, J. 1989. Palon kehittyminen Järvenpään huoneistopalossa. Palontorjuntatekniikka, vol. 19, nro 1, s. 26 - 28.
- Mangs, J. 1991. Autojen polttokokeet. Palontorjuntatekniikka, vol. 21, nro 4, s. 28 - 30.
- Mangs, J. & Keski-Rahkonen, O. 1994. Characterization of the fire behaviour of a burning passenger car, Part I: Car Fire Experiments. Fire Safety Journal, vol. 23, nro 1, s. 17 - 35.
- Marinoff, E. 1993. Fire caused by lightning. Sandwich South Township, September 7, 1990. Ontario: Ministry of the Solicitor General, Office of the Fire Marshal. 5 s.
- McGinley, H. 1986. Motor vehicles. Teoksessa: Cote, A. E. (toim.) NFPA Fire Protection Handbook, Sixteenth Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association. s. 13 - 20 - 13 - 30.
- McNeil, M. 1993. Fatal dwelling fire. Wellington County, Ontario, 8 August, 1991. Ontario: Ministry of the Solicitor General, Office of the Fire Marshal. 14 s. + liitt. 3 s.
- Meland, Ø. & Lønnvik, L.E. 1990. Fullskalaforsøk - overflater I korridor og trappesjakt fra Scandinavian Star. Målerapport, SINTEF, NBL STF25 F90011, teoksessa NOU 1991:1B, "Scandinavian Star"-ulykken, 7. april 1990, 1991. Norges offentlige utredninger, Vedlegg, Statens forvaltningstjeneste, Oslo, s. 491 - 579.
- Miekk-oja, H. M. 1965. Metallioppi. Helsinki: Otava. 671 s.
- Mikkola, E. 1990a. Puun hiiltyminen. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 40 s. (VTT Tutkimuksia 689).
- Mikkola, E. 1990b. Kartiokalometri. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 22 s. (VTT Tiedotteita-Meddelanden-Research Notes 1087).

- 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.
- Moodie, K. & Jagger, S.F. 1992. The King's Cross fire: results and analysis from the scale model tests. *Fire Safety Journal*, vol. 18, nro 1, s. 83 - 103.
- Mökkönen, K. 1986. Hanasaaren voimalapalo saatiin hallintaan noin kahdessa tunnissa, *Palontorjunta*, vol. 37, nro 6, s. 365 - 366.
- Nagy, J. & Verakis, H.C. 1983. *Development and Control of Dust Explosions*. New York: Dekker. 279 s.
- Nelson, H.E. 1987. An engineering analysis of the early stages of fire development - the fire at the Dupont Plaza Hotel and Casino - December 31, 1986, NBSIR 87-3560, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD. 113 s.
- NOU 1991:1A. "Scandinavian Star"-ulykken, 7. april 1990, 1991. Norges offentlige utredinger, Hovderapport, Statens forvaltningstjeneste, Oslo. 206 s.
- NOU 1991:1B. "Scandinavian Star"-ulykken, 7. april 1990, 1991. Norges offentlige utredinger, Vedlegg, Statens forvaltningstjeneste, Oslo, 738 s.
- Ollila, O. 1973. Öljyvaraston palon ennaltaehkäisy ja palon sammuttaminen. *Palontorjunta*, vol. 24, nro 6, s. 362 - 364.
- Quintiere, J. G., 1995. How did the fire in Waco start? An expert explains. *NFPA Journal*, vol. 89, nro 6, s. 91 - 93.
- Quintiere, J. G. & Mowrer, F. 1993. Fire development analysis, Mount Carmel Branch Davidian Compound, Waco, Texas, April 19, 1993. 46 s. + liitt. 174 s.
- Robertsson, A., Karlsson, S.-E., Strand, G. & Nilsson, G. 1988. Smältskador på elektriska ledare. Linköping: SKL - Kriminaltekniska laboratoriet. 35 s. (SKL - Kriminaltekniska laboratoriet, Rapport 20.)
- Roitto, R. Kuparimetallit. Teoksessa: *Tekniikan käsikirja*, osa 2. 8. painos. Jyväskylä: Gummerus. S. 279 - 323.
- SFS-Käsikirja 60. 1984. Räjähdyksvaaralliset pölyt. Turvallisuusohjeet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. 67 s.
- Simcox, S., Wilkes, N.S. & Jones, I.P. 1992. Computer simulation of the flows of hot gases from the fire at King's Cross Underground Station. *Fire Safety Journal*, vol. 18, nro 1, s. 49 - 73.
- Sulonen, M. 1981. Metallioopin perusteet. Teoksessa: *Tekniikan käsikirja*, osa 2. 8. painos. Jyväskylä: Gummerus. S. 251 - 278.

Suuronnettomuuden tutkintaselostus N:o 2/1989, Neste Oy:n Porvoon tuotantolaitosten varastosäiliön R-2 tulipalosta 23.-24.3. 1989. Helsinki: Oikeusministeriö (1990). 78 s.

Townshend, A. (toim.) 1995a. Encyclopedia of analytical science. London: Academic Press. Vol. 3, s. 1761 - 1913.

Townshend, A. (toim.) 1995b. Encyclopedia of analytical science. London: Academic Press. Vol. 5, s. 2803 - 3034.

Tremblay, K.J. 1994. Catastrophic fire deaths: the numbers are back up. NFPA Journal, vol. 88, nro 5, s. 88 - 109.

Welty, J.R., Wicks, C.E. & Wilson, R.E. 1984. Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer. 3rd Ed. New York : Wiley. 803 s.

Wighus, R. & Fagertun, J.A. 1990. Beregning av røykspredning ved brannen I Scandinavian Star, SINTEF, NBL STF25 F90012, teoksessa NOU 1991:1B, "Scandinavian Star"-ulykken, 7. april 1990, 1991. Norges offentlige utredninger, Vedlegg, Statens forvaltningstjeneste, Oslo, s. 581 - 657.

Ölander, K. 1973. Yleiskuvaus Oy Esso Ab:n tuontivaraston palosta Kokkolan Ykspihlajassa. Palontorjunta, vol. 24, nro 6, s. 334 - 338.

HAKEMISTO

A

Alumiini.....	36
Alumiinin ja kuparin vuorovaikutus.....	35
Augerelektronispektroskopia.....	38

C

Coanda-ilmiö	71
--------------------	----

D

Dupont Plaza Hotel and Casino	78
-------------------------------------	----

E

Ensisijaiset valokaarijäljet	38
Epätäydellinen oikosulku	37

F

FIRST	79
-------------	----

H

Hanasaaren turbiinihallin palo.....	85
Hartmannin putki.....	18
HARWELL-FLOW3D	71
Hehkulamppu	52
Henkilöautojen palokokeet	56
Henkilöauton paloteho.....	59
Hihnakuljetin	86
Hiiltymisnopeus.....	22
Hotelli Heinolanhovin nestekaasuräjähdyks	86

I

Infrapunakamera.....	81
Irtokosketus	38
ISO:n 1 m ³ :n astia.....	18
Itsesyttyminen	16
Itsesyttymislämpötila	7; 16

J

Järvenpään huoneistopalo.....	47
-------------------------------	----

K

Kaasukromatografia.....	24
KAMELEON II	75
Kartiokalorimetri	29
King's Crossin metroaseman palo	70
Kokkolan säiliöaluepalo	87
K _{st} -arvo	18

Kuparijohdin	36
Kuparijohtimien mekaaniset vauriot.....	44
Kuparin mikrorakenne	31
Kuparin sulaminen	31
Kuumat liitokset.....	45
Kuusankosken hakekuljettimen palo	86
Kuutiojuurilaki	11
Kvadrupolimassaspektrometri	27

L

Leimahduslämpötila	7
Liekki-ionisaatiodetektori.....	25
Liukuportaat.....	70
Lämmönjohtavuus	20
Lämpötilanjohtavuus	20
Lämpötunkeutumiskerroin.....	20
Lämpötyyny.....	50
Löystyneet ruuviliitokset	46
Löysä liitos.....	38

M

Maasulku	37
Massaspektrometri	27
Minimisyttymisenergia	16

N

Nestekaasuräjähdyks.....	86
--------------------------	----

O

Oikosulku.....	37; 39; 41; 65
Ominaislämpökapasiteetti.....	20

P

Palavat kaasut	7
Palavat nesteet	7
Pölyjen räjähdysvaaraluokittelu.....	18
Pölyn hiukkaskoko	12
Pölyn kosteuspitoisuus.....	13
Pölyn syttyminen	15
Pölyräjähdysten	
maksimipaineennousunopeus.....	8
Pölyräjähdysten testausmenetelmät	18
Pölyräjähdys	7
Pölyt.....	7

R		T	
Rakennusmateriaalien lämpötekniisiä		Tiheys	20
ominaisuuksia	20	Toissijaiset valokaarijäljet	38
Räjähdyspaine	10	Tulipalon numeerinen simulointi..	70; 74; 78
Räjähdyksrajat.....	17	Turbulenssi	14
S		U	
Salama	68	Uomailmiö	73
Scandinavian Star-laivan palo	74	Uppokuumennin	63
Seostuminen	35	Uretaanilammikko	47
Sinkki.....	36	Uudelleenkiteytyminen.....	32
Siwekin 20 litran pallo.....	18	V	
Sohvan palaminen	47	Valokaari	37; 40; 41; 43; 85
Sulamislämpötiloja	23	Virtauslaskenta	71
Syttymis(räjähdyks)rajat.....	7	Y	
Syttymishetken määrittäminen	80	Ylikuormitus	41; 43
Sähköpalo	35		



Tekijä(t) Mangs, Johan Keski-Rahkonen, Olavi	Projektin nimi Uudet tutkimusmenetelmät palonsyyn tutkinnassa	
	Toimeksiantaja(t) Palosuojelurahasto, Palotutkimusraati, sisäasiainministeriön poliisiosasto	
Nimeke <h2>Palonsyyn selvittäminen 2</h2> <h3>Oppikirja, osa 2</h3>		
Tiivistelmä <p>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.</p> <p>Tässä toisessa osassa esitetään palavien aineiden ominaisuuksia, laboratoriomenetelmiä, sähköjohtojen ja -kytkimien vaurioiden tutkimisen kirjallisuuskatsaus, tulipalojen kuvauksia, luettelo Suomen merkittävistä tulipaloista sekä projektissa tehdyn kirjallisuushaun aikana löydetty palonsyyn selvittämiseen liittyvä aineisto.</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 951-38-5173-7	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 120 s.	Hintaryhmä C

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 talousvesiverkostojen 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 IDEF. 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. Sammuttejauheet. 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.

