

12. Palovirta ja paine palohuoneessa

12.1 Hiukan historiaa

Joulukuussa 1995 kokoonnuimme Bengt Hägglundin luo keskustelemaan nimikkeistökysymyksestä ennen tuuletusjärjestelmien palosuojatekniikan käsikirjan laatimista. Bengtin lisäksi paikalla olivat Lars Jensen (LTH), Staffan Bengtson ja Tomas Fagergren (Brandskyddslaget) ja Bo Backvik (PBL Kontroll). Tapaamisen tarkoituksena oli yhtenäistää kaksi tutkimusraporttia, *Simulating fires in natural and forced ventilated enclosures* (Hägglund 1986) ja *Enkelsystem analys av rökspridning i ventilationssystem* (Jensen 1988). Pian tapaamisen alkamisen jälkeen kävi ilmi, että raporteissa oli tärkeä yhteinen tekijä: paineen kehittyminen, joka johtui erilaisten vuotojen aiheuttamasta palo-osaston ulosvirtauksen paineenlaskusta. Hägglund analysoi savunmuodostuksen aiheuttamaa kaasumassan muutosta sekä laajentumisvaikutuksia kaasumassan lämmitessä ja virran suuntautuessa ulos palo-osastosta. Jensen analysoi edellytyksiä savun leviämiselle palo-huoneesta toiseen osastoon ilmastointijärjestelmän kautta. Hän tutkii rajatapauksen riippuvuutta palopaineesta ja palovirrasta, joka on Jensenin raportissa esitelty käsite.

Tapaamisen osallistujat olivat yhtä mieltä siitä, että palovirtaa tulisi käyttää nimityksenä lämpölaajenemiselle huoneessa olevan tulipalon tapauksessa.

Täydellisempänä kuvauksena voidaan käyttää *palon aiheuttamaa virtausta*.

12.2 Yleistä

12.2.1 Mikä palovirta on

Palon aiheuttamalla virtauksella – palovirralla – tarkoitetaan tilavuuden lämpölaajenemista aikayksikköä kohti huoneessa, jossa tulipalo syttyi. Palovirta syntyy aina riippumatta siitä, onko palo-osasto suljettu vai avoin.

Palovirran vaikutus on kiinnostavin, jos palo syttyy ”lähes suljetussa” tilassa, sillä lämpölaajeneminen nostaa palo-osaston painetta. Paineennousun suuruus määräytyy huoneen tiiviynen sekä huoneessa olevan ilmastointijärjestelmän rakenteen mukaan. Suuri paineennousu lisää riskiä palon leviämiselle viereisiin tiloihin ilmastointikanavien kautta. Tätä käsitellään luvussa 24.

Jos palo syttyy suljetussa huoneessa, se ottaa kaiken palamisilman palohuoneesta.

Tämän seurauksena palohuoneen happipitoisuus laskee, ja jos huoneen vaipassa ei tapahdu muutoksia, palo tukahtuu ja parhaassa tapauksessa sammuu ja jäähtyy itsestään.

Toisessa tapauksessa huoneessa saattaa olla palamattomia palokaasuja ja hehkupaloa, ja oven tai ikkunan avaaminen voi aiheuttaa erittäin nopean syttymisen, niin sanotun leimahduksen.

Kolmas mahdollinen tilanne on se, että palamattomat palokaasut vuotavat palohuoneen vieressä olevaan huoneeseen, jossa ne voivat sekoittua ilmaan. Sekoitus voi syttyä, jolloin syntyy voimakas paineennousu, niin sanottu palokaasuräjähdyks.

Neljännessä tilanteessa ikkunat romahtavat lämpöjännitteiden vuoksi, sisään tulee palamisilmaa ja palon kasvuvaihe saa uutta vauhtia. Ikkunoiden romahtaminen vapauttaa myös palotilan paineen.

12.2.2 Keskipalovirta

Kun palovirta kasvaa, palotilassa syntyvä ilmatilavuus kasvaa, sillä palon alkuvaiheessa muodostuu savua ja palokaasujen lämpötila nousee. Oletetaan, että palohuoneen koko ilmatilavuuden lämpötila T_1 nousee T_2 asteeseen (K) t sekunnin aikana. Tällöin palohuoneen ilmatilavuus V kasvaa kyseisenä ajanjaksona seuraavasti:

$$V_b = (T_2 / T_1 - 1) \cdot V / T \quad (\text{m}^3)$$

ja keskipalovirraksi tulee

$$q_b = ((T_2 / T_1 - 1) / t) \cdot V \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

Jos huoneen tilavuus on 45 m^3 ja lämpötila nousee 100°C :sta (373 K) 200°C :een (473 K) 60 sekunnin aikana, ilmatilavuus kasvaa 12 m^3 ja keskipalovirraksi tällä ajanjaksolla saadaan $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$.

12.3 Palovirran määrittäminen

12.3.1 Yleistä

Palovirran määrittämiseen on useita menetelmiä yksinkertaisesta pika-arvioinnista edistyneisiin tietokoneohjelmiin.

Kuten aina, kun kyse on palolaskelmista, mukana on useita epävarmuustekijöitä, joiden suhteen on pakko tehdä oletuksia. Tämän julkaisun ydinalueella, palontorjunnassa ja asennuksissa, tarvitaan lisää tutkimusta osittain suoraan tällä tekniikka-alueella, osittain sellaisina alueilla, joilla asennustekniikan palosuojaus integroidaan rakennuksen strategiseen palosuojaukseen.

Siksi ei tule ihmetellä, jos eri menetelmillä saadaan erilaiset laskentatulokset. Syynä ei ole se, että yksi menetelmä olisi oikea ja toinen väärä, vaan se, että laskennan perusteina käytettävien oletusten tekeminen on vaikeaa.

Otetaanpa esimerkiksi niinkin yksinkertainen asia kuin palon kehitysnopeus. On hyvin hankalaa määrittää sataprosenttisella todennäköisyydellä, onko palon kehitysnopeus Fast vai Medium (11.4.3).

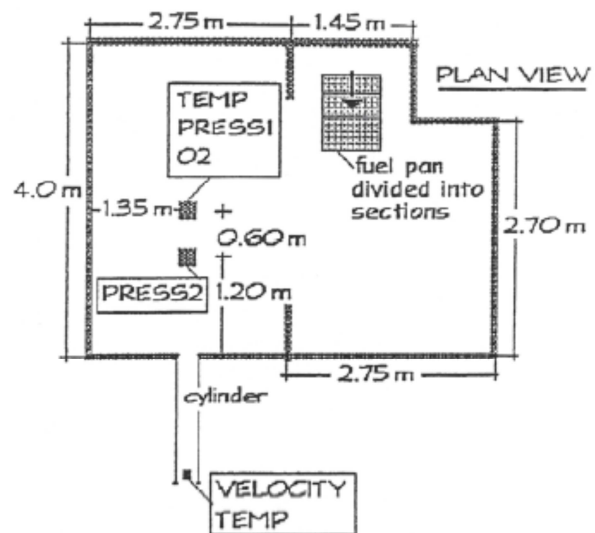
Seuraavassa kuvattujen menetelmien kohdalla tulee harkita, voidaanko menetelmään helposti yhdistää herkkyysanalyysi, jonka avulla voidaan kompensoida riittävien syöttötietojen valinnan vaikeutta.

12.3.2 Tehdyt käytännön kokeet

FOA (nykyinen FOI) teki vuonna 1996 tutkimusprojektin yhteydessä käytännön yrityksen tutkia palon kehitystä lähes suljetussa huoneessa. Koe kuvattiin raportissa *Pressure rise due to fire growth in a closed room, Hägglund m.fl., 1996*. Kokeessa tehtiin kolme täysimittaista palokoetta (kuva 12.3.2:1) käyttämällä NFPA:n käyrien (11.4.3) mukaisia palonkehitysnopeuksia.

Kokeessa rekisteröidyt suureet olivat

- lämpötila
- virtaus ja sen suunta
- paine.



Kuva 12.3.2:1

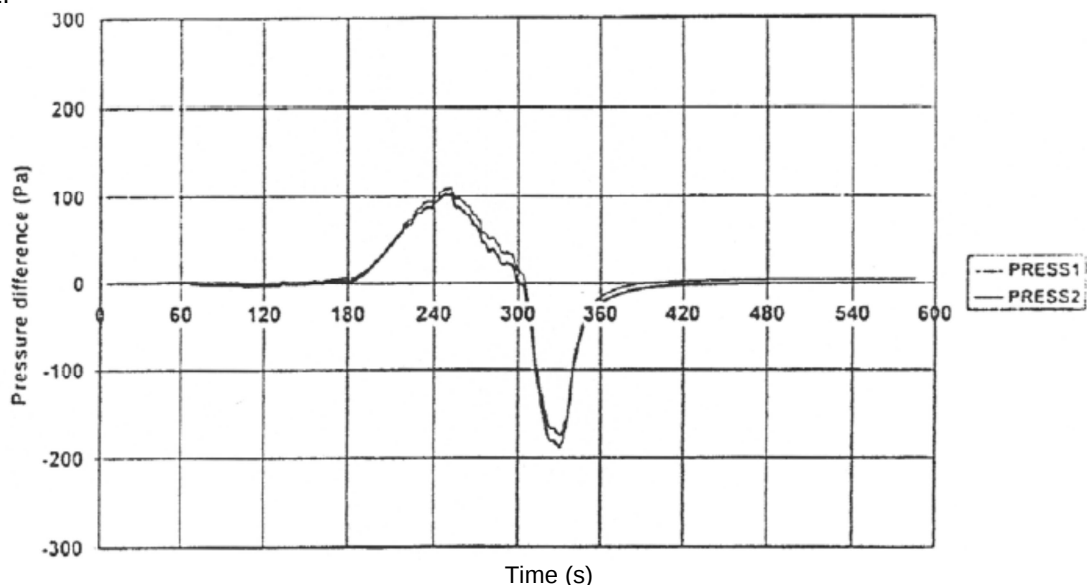
Koejärjestely

Koetilana käytettiin tiivistä betonitilaa, jonka pinta-ala oli 20 m². Tilaan sijoitettiin heptaanikappale, jonka palavan pinnan kokoa voitiin säätää ulkopuolelta siten, että voitiin saavuttaa erilaisia palonkehitysnopeuksia.

Koehuoneen yhteen seinään asennettiin putki, jonka halkaisija oli 200 mm.

Yhdessä kokeessa simulointiin tulipalo, jonka kehitysnopeus oli lähellä NFPA:n Fast-määritystä.

Kokeessa rekisteröitiin muun muassa palohuoneen paine ajan funktiona (katso esimerkki kuvassa 12.3.2:2).



Kuva 12.3.2:2
Paine koehuoneessa

Kuten kuvasta näkyy, huoneeseen muodostui noin 2 minuutin kuluessa ylipaine, jonka maksimi oli noin 100 Pa. Sen jälkeen palo sammui hapenpuutteen vuoksi. Happipitoisuus oli tällöin noin 12 %. Palon sammussa huoneeseen muodostui lyhytaikainen alipaine ympäröivien rakennesien jäähdytysvaikutuksen vuoksi. Alipaineeksi mitattiin noin 200 Pa. Huoneeseen tuotiin nyt lisää palamisilmaa ulkopuolelta. Tämän lisähapen avulla palo voi alkaa uudelleen ja jatkaa tällaista pulssimaista toimintaa, kunnes kaikki palava aine on kulutettu.

Tässä kokeessa palo ei alkanut uudelleen, koska käytettiin heptania eikä huoneessa ollut sytytysliekkiä.

Putken kautta ulos virtaava kaasumäärä on palovirta, jonka suuruus määräytyy kulloisenakin ajankohtana kehittyneen palotehon mukaan.

Palovirran mitatut arvot ovat hyvin lähellä jäljempänä kuvattujen eri laskentatapojen avulla määritettäviä arvoja.

Katso myös esimerkki 5 luvussa 12.3.5, Käytännön laskennat DSLAYV:n avulla.

12.3.3 Lähtökohtana paloteho

Lämpölaajeneminen eli palovirta on suoraan verrannollinen palotilan ylimmän kaasukerroksen lämpötehoon. Raportissa *Simulating fires in natural and forced ventilated enclosures*, 1986, Hägglund osoittaa, että

$$\dot{m} = Q_b / c_p \cdot T_0 \quad (\text{kg/s})$$

jossa

Q_b = kaasumassan lämpöteho, W

c_p = ilman lämpökapasiteetti, J/kgK (12.7.5)

T_0 = palovirran lämpötila, K (lattiavyöhyke)

Ongelmana on tekijän Q_b määrittäminen.

Palotehosta itsessään on runsaasti tietoja, jotka on simuloitu tietokoneohjelmilla tai dokumentoitu erilaisissa käytännön kokeissa.

Sen sijaan tiedot edellä olevan lausekkeen tekijästä Q_b ovat varsin niukat.

Palotilan paloteho siirtyy osittain ylimpään kaasukerrokseen, osittain palotilan lattiaan, seiniin ja kattoon. Ylimpään kaasukerrokseen siirtyvän palotehon osuus voi olla noin 20–40 % esimerkiksi palon luonteen ja huoneen geometrian mukaan. Yleisenä arviona voidaan käyttää, että 1/3 tehosta siirtyy kaasukerrokseen, jos palo syttyy lähes suljetussa huoneessa ja hapen taso puolittuu. Näissä olosuhteissa voidaan soveltaa peukalosääntöä, jonka mukaan 1 MW:n paloteho tuottaa palovirran 1 m³/s (Lars Jensen, 2006).

Palovirran määrittäminen palotehon perusteella on yleisesti ottaen melko karkea menetelmä, ja on parempi käyttää jotakin toista menetelmää.

12.3.4 DSLAYV-laskentaohjelma

Alkuperäisessä menetelmässä käytetään DSLAYV-laskentaohjelmaa, joka perustuu raporttiin *Simulating fires in natural and forced ventilated enclosures*, Bengt Hägglund 1986.

Ohjelma kuvataan lyhyesti tässä luvussa. Lisäksi luvussa kuvataan ja analysoidaan muutamia käytännön esimerkkejä DSLAYV:n avulla.

DSLAYV-ohjelma

Laskennassa voidaan käyttää DSLAYV-tietokoneohjelmaa (Bengt Hägglund). Käytettävissä kaksivyöhykemallissa oletetaan, että huoneessa on kaksi homogeenista kaasukerrosta (vyöhykettä), lämmin yläkerros ja jäähtynyt alakerros. Palon edetessä ylemmän palokaasukerroksen lämpötila nousee ja kerroksen paksuus kasvaa. Ohjelma laskee palokerroksen paksuuden ja keskilämpötilan, kun palon koko annetaan. Vyöhykemallia on testattu kokeellisesti saaduilla arvoilla ja saavutettu hyviä tuloksia.

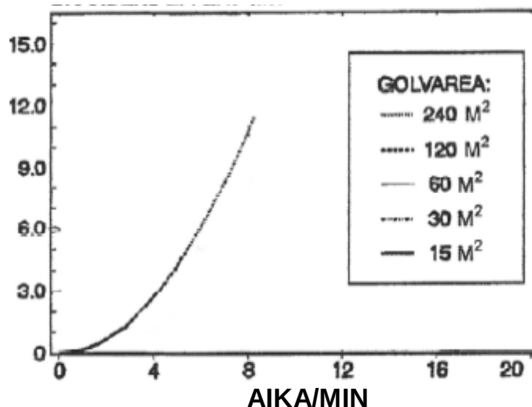
DSLAYV:n avulla voidaan myös laskea monia muita arvoja, kuten palovirta, kaasumassan ulostulovirtaus, happi- ja CO-pitoisuudet, nokipitoisuus sekä paine palotilassa.

Palokaasun muodostumisaika, palokaasujen lämpötila sekä palovirta voidaan laskea erikokoisille tiloille ja erilaisille palonkehitysnopeuksille. Laskennallista tulosta voidaan pitää summittaisena arvona annetuille suureille.

Hapen puute huoneessa voi rajoittaa palon kokoa. Toisin sanoen palon kehitys ja intensiteetti pienenevät happipitoisuuden alentuessa. Tällöin lämpötila laskee ja palovirta pienenee.

DSLAYV:llä tehdyissä laskelmissa edellytetään, että tulipalo "elää omaa elämäänsä" ja että kasvu tapahtuu aluksi oletetun käyrän mukaisesti (yleensä kyseessä on NFPA:n käyrä, katso 11.4.3) eli palamisilmaa on vapaasti saatavana. Kuvasta 12.3.4:1 näkyy, että palon kehityksen oletetaan jatkuvan maksimipalovirran jälkeen ikään kuin happipitoisuus ei laskisi – eli palo "elää omaa elämäänsä".

NFPA:N KASVUKÄYRÄ FAST PALOTEHO/MW

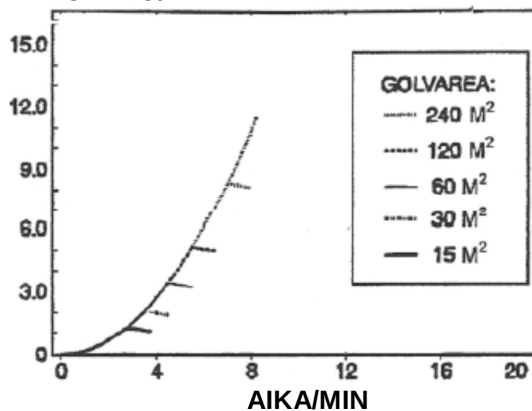


Kuva 12.3.4:1

Kuvassa 12.3.4:1 esitetään NFPA:n käyrä, jossa palo saa kasvaa rauhassa ilman laskevan happipitoisuuden vaikutusta.

Jos sen sijaan halutaan kuvata paloa, joka syttyy yhdessä huoneessa ja jolla on käytettävissään rajallinen määrä palamisilmaa, palon kehitys tapahtuu käyrän mukaisesti, kunnes happipitoisuus on laskenut 10–12 prosenttiin. Tässä kohdassa kasvukäyrä katkeaa ja palovirran, palokaasun lämpötilan sekä palokaasun määrän kasvu hidastuu. Katso kuvat 12.3.4:2, 3 ja 4.

PALOTEHO/MW

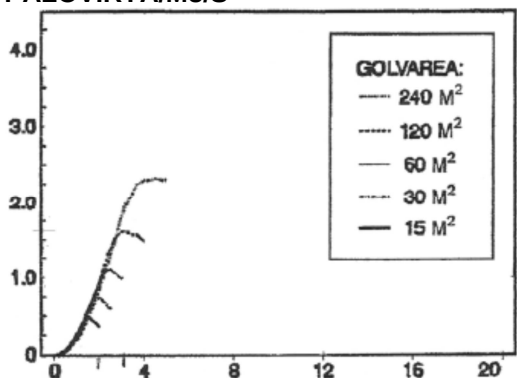


Kuva 12.3.4:2

Palon kehitys katkeamiskohtineen

Katkeamiskohtissa palotilan happipitoisuus on laskenut noin 10 prosenttiin. Huomaa, että palovirran maksimi on jo ohitettu (kuva 12.3.4:3).

PALOVIRTA/M3/S



AIKA/MIN

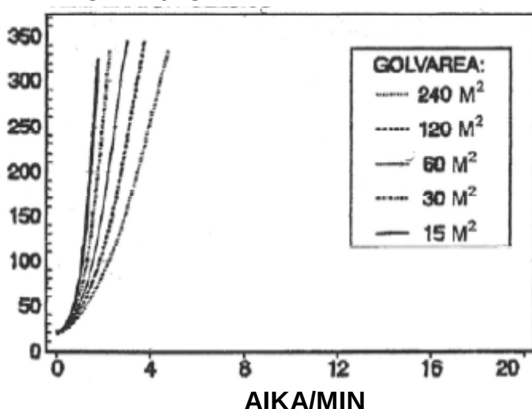
Kuva 12.3.4:3

Palovirta

Kun palovirtaa (kuva 12.3.4:3) lasketaan DSLAYV:llä, palovirran katsotaan olevan ns. "kylmä" palovirta eli se virtaa ulos palotilan lämpimän palokaasukerroksen alla olevasta viileästä kerroksesta. Katso esimerkiksi Ondrus-laskentaesimerkki (luku 12.5.6).

Palovirran laskennassa otetaan huomioon happipitoisuuden pieneneminen.

PALOKAASUKERROKSEN LÄMPÖTILA/°C



Kuva 12.3.4:4

Kaaviossa annettu palokaasun lämpötila on ylempään palokaasukerroksen keskilämpötila.

Katso myös luvun 12.3.5, Käytännön laskennat DSLAYV:n avulla, esimerkki 1.

Kuten kuvasta 12.3.4:3 näkyy, palovirta kasvaa ajan funktiona maksimiin saakka. Laskettaessa riskiä palokaasun leviämiseksi ilmastointijärjestelmän kautta syötearvona käytetään kuitenkin maksimiarvoa, jolloin mukana on tietty turvamarginaali.

Laskettaessa katkeamiskohtien ajankohtia tietyllä palon kehitysnopeudelle oletetaan, että huoneessa on vain pieniä vuotoja eli huone on "lähes suljettu". Tämä on varovainen oletamus. Vuodot saavat huoneen happipitoisuuden laskemaan nopeammin kuin tiiviissä huoneessa, koska kaikkea happea ei käytetä palamiseen vaan osa menetetään vuotojen vuoksi (kuva 11.10.2:3).

Palovirran määrittäminen DSLAYV:llä, yleistä

Julkaisua *En handbok om brandskyddsteknik för ventilationssystem*, 1996, varten Bengt Hägglund teki joukon laskelmia palotehosta, palovirrasta, palokaasukerroksen lämpötilasta ja palokaasun täyttöasteesta viidessä erikokoisessa huoneessa (15–240 m²) käyttämällä palon kehitysnopeuksia Slow, Medium, Fast ja Ultrafast (katso 11.4.3).

Ympäröivien seinien, lattian ja katon oletetaan laskelmissa koostuvat eristävästä materiaalista, jolla on kevytbetonin ominaisuudet.

Jos ympäröivät pinnat ovat betonia, palovirta pienenee yleisesti ottaen noin 15 %, sillä huoneen ylimmän kaasumassan lämpöteho pienenee (huoneen pintojen aiheuttamat häviöt kasvavat).

Tässä ei selitetä Hägglundin koko laskentatulosta (katso edellä mainittu julkaisu) vaan annetaan vain taulukko kaaviosta luetuista pyöristetyistä palovirran maksimiarvoista.

Taulukko 12.3.4:1

Palovirta (l/s) erikokoisissa huoneissa erilaisilla palon kehitysnopeuksilla (NFPA). Pyöristetyt arvot.

Pinta/ Korkeus	Slow	Medium	Fast	Ultra fast	Sohva	Sänky
15/2,5	125	225	400	725	300	300
30/2,5	175	325	575	1 050		
60/2,5	250	450	825	1 450	1 200	700
120/2,5	350	650	1 150	2 050		
240/2,5	500	925	1 650	2 950	1 800	700
30/3,0		390	700			
120/3,0		800	1 400			

Näitä arvoja laskettaessa on turvamarginaalina oletettu, ettei huoneessa ole vuotoja tai muuta ulosvirtausta, ennen kuin happipitoisuus on laskenut noin 10–12 prosenttiin, jolloin palon kehitys pysähtyy. Tämä siksi, että mahdollisimman paljon happea olisi käytettävissä palon kehitykseen tulipalon alkuvaiheessa.

Kuten taulukosta näkyy, palovirta kasvaa, kun huoneen tilavuus ja palon kasvunopeus kasvavat. Palovirta saavuttaa maksimiarvonsa, ennen kuin palotilan happipitoisuus on laskenut 10–12 prosenttiin.

Taulukossa annettujen palovirtojen oletetaan poistuvan palotilasta kaksivyohtymällä alemman (jäähdytyneen) kerroksen kautta.

Laskelmissa oletetaan, että ikkunat ovat ehjät laskelmien kattamana ajanjaksona. Lisäksi huoneen oletetaan olevan ”lähes suljettu” eli siinä on vain vähäisiä vuotoja.

Lisätietoja on luvussa 12.5.

Lisäksi taulukon arvot on laskettu pinta-aloille 15–240 m², korkeudelle 2,5 m ja NFPA:n kasvunopeudelle Medium/Fast:

Medium

- Kaasumassan antoteho on noin 0,05 MW (15 m²) – noin 0,3 MW (240 m²), mikä vastaa noin 20–25 prosenttia palotehosta.
- Palokaasukerros saavuttaa lämpötilan 300–350 °C noin 4 minuutissa (15 m²) – noin 8 minuutissa (240 m²).
- Palokaasukerros on noin 0,2 m lattian yläpuolella noin 3 minuutin kuluttua (15 m²) – noin 0,5 m lattian yläpuolella noin 10 minuutin kuluttua (240 m²).

Fast

- Kaasumassan antoteho on noin 0,1 MW (15 m²) – noin 0,5 MW (240 m²), mikä vastaa noin 20–25 prosenttia palotehosta.
- Palokaasukerros saavuttaa lämpötilan 300–350 °C noin 3 minuutissa (15 m²) – noin 5 minuutissa (240 m²).
- Palokaasukerros on noin 0,2 m lattian yläpuolella noin 2 minuutin kuluttua (15 m²) – noin 0,6 m lattian yläpuolella noin 6 minuutin kuluttua (240 m²).

Palava sohva tai sänky

- Palokaasukerros saavuttaa lämpötilan 250–300 °C vain pinta-alan ollessa 15 tai 60 m², ei 240 m² (100–200 °C).
- Palokaasukerros on alimmillaan noin 0,8 m lattiasta (240 m²) noin 8–10 minuutin kuluttua, muuten lähes lattian tasossa noin 4–7 minuutin kuluttua.

12.3.5 Käytännön laskennat DSLAYV:n avulla

Seuraavissa laskelmissa tilan oletetaan olevan "lähes suljettu", ellei otsikossa toisin todeta.

Yleiskatsaus laskentaesimerkeistä:

1. Laskettuihin tietoihin liittyviä näkökohtia – katso alla
2. Medium ja Fast; 20, 50, 100 m²; ei sprinkleriä / sprinkleri; paloteho, palovirta, CO-pitoisuus – katso tämä luku
3. Medium ja Fast; 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 ja 250 m²; huoneen korkeus 3, 4, 6 m; ei sprinkleriä / sprinkleri; paloteho, palovirta – katso alla
4. NFPA Medium verrattuna oletettuun luonnolliseen palon kulkuun; 40 m² / 2,5 m; palojen koot, happipitoisuus, palokaasuton korkeus, palokaasun lämpötila, palovirta – katso tämä luku
5. Medium; 100 m² / 2,5 m; pulssimainen palo; paloteho, palovirta, happipitoisuus, palokaasuton korkeus, palokaasun lämpötila – katso tämä luku
6. Palo suljetussa ilmastointihuoneessa – luku 17
Palo ilmastointihuoneessa, josta on yhteys kuiluun – luku 17
7. Palokaasun lämpötila, kun tulipalo on hissikuiluun liitettyssä hissien konehuoneessa – luku 28
Palovirta, paineen kasvu, hissien konehuone – luku 28
8. Palon oletettu kulku hoituhuoneen sängyssä ja sohvassa; 12 ja 40 m² / 2,5 m; noentuotanto/näkyvyys, paloteho, palokaasuton korkeus, palokaasun lämpötila; palokaasujen nokipitoisuus, prosessiaika noin 10 minuuttia – katso 24.16
9. Palon oletettu kulku sohvassa; 15, 50 ja 100 m² / 2,5 m; paluhuoneen ovi on auki; paloteho; palokaasujen nokipitoisuus; prosessiaika noin 60 minuuttia – katso 24.16
10. Autopalo autotallissa – katso 24.17
11. Lämpötila ja happipitoisuus suljetussa kuilussa tapahtuvassa palossa – luku 18
12. Nokipitoisuus huoneessa 1 000 m², h = 3 m – katso 24.16
13. Palovirta kellaritiloissa, ei sprinkleriä, kylmä ja lämmin palovirta – katso tämä luku
14. Palovirta kellaritiloissa, sprinkleri käytössä – katso tämä luku
15. Laskennallinen paineen nousu palotilassa, ovi käytävään kiinni/auki – katso tämä luku

Johonkin tiettyyn lukuun liittyvät laskentaesimerkit ovat kyseisen luvun lopussa.

Laskentaesimerkki 1 – palo hoitohuoneen sängyssä – keskustelua palovirrasta

DSLAYV:llä lasketaan palokaasuton korkeus sekä palokaasujen keskilämpötila ja happipitoisuus ”suljetussa” huoneessa syttyvässä palossa. Lisäksi lasketaan palovirta sekä noki- ja CO-pitoisuus tietylle palon kehitykselle huoneessa. Huoneen pinta-ala on 20 m² ja korkeus 2,6 m.

Oletetaan, että hoitosänky palaa. Käytettävä palokäyrä esitetään kuvassa A. Palo alkaa tavallisesta hoitohuoneen sängystä. Kuvassa B esitetään vertailuna muita mitattuja sänkypaloja.

Palohuoneen happipitoisuus otetaan huomioon, jotta voidaan arvioida palohuoneen laskettujen lämpötilojen paikkansapitävyys. Tulee huomata, että DSLAYV-ohjelmassa palon annetaan ”elää omaa elämäänsä” huoneen happipitoisuudesta riippumatta. Huoneen happimäärä ei vaikuta käyttäjän määrittämään huoneessa muodostuvan tehon arvoon.

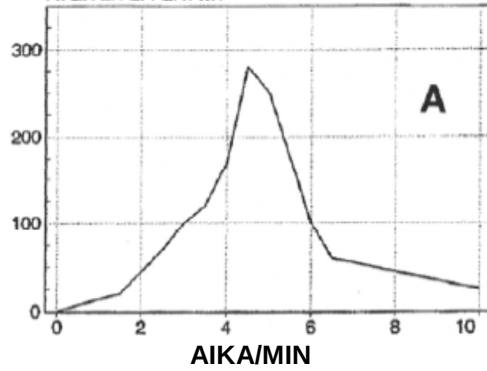
Kuvasta C näkyy, että palovirta saavuttaa maksiminsa noin 4 minuutissa, kun palokaasut (kuva D) ovat lähellä lattiatasoa.

Neljässä minuutissa happipitoisuus on noin 13–14 % ja palo kehittyy edelleen noin 280 kW:iin noin 4,5 minuutissa. Tässä vaiheessa happipitoisuus laskee noin 10 prosenttiin ja palo pysähtyy.

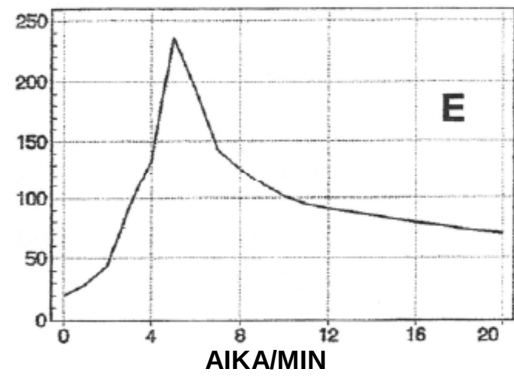
Jäähtymisvaiheessa CO-pitoisuus ja happipitoisuus nousevat matalassa happimäärässä tapahtuneen epätäydellisen palamisen vuoksi, ja palohuoneessa saattaa esiintyä kyttemistä.

Happipitoisuus nousee hiukan noin 6 minuutin kuluttua, mikä voidaan selittää palotilan paineen muuttumisella jäähtymisen jatkuessa (huoneeseen saattaa vuotaa happea).

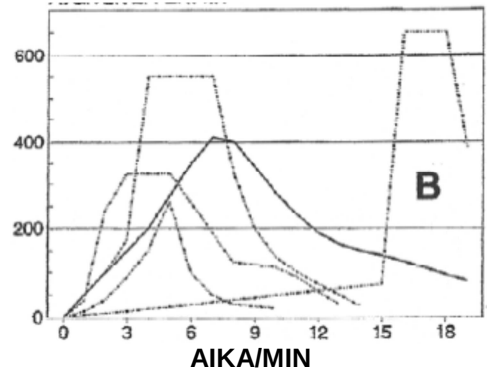
**HUONEEN KOKO 4x5x2,5 m (korkeus)
ANTOTEHO / KW**



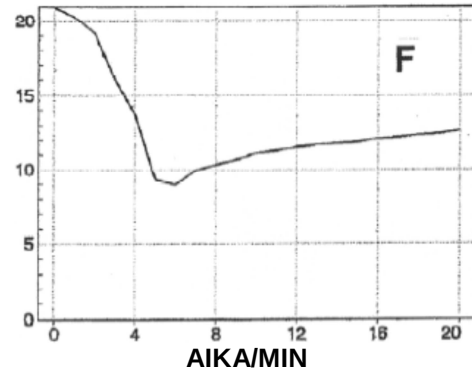
**PALOKAASUKERROKSEN LÄMPÖTILA
°C**



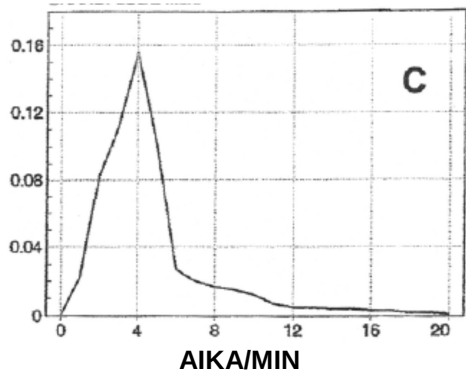
**ESIMERKKI MITATUISTA SÄNKYPALOISTA
ANTOTEHO/KW**



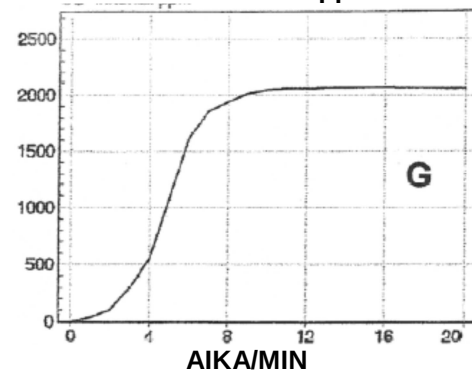
**HAPPIPITOISUUS
%**



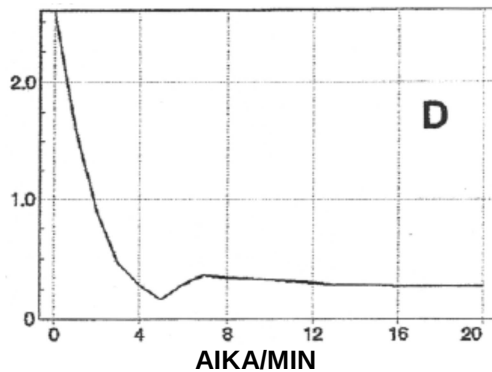
PALOVIRTA m³/s



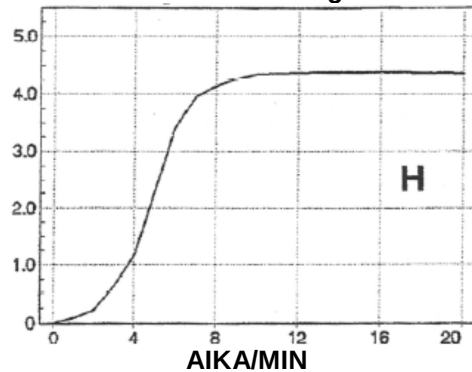
CO-PITOISUUS/ppm



PALOKAASUTON KORKEUS / m



NOKIPITOISUUS g/m³



Kuva 12.3.5:1 Kuvat A–H

Laskentaesimerkki 2 – palovirta/CO-pitoisuus – ei sprinkleriä / sprinkleri

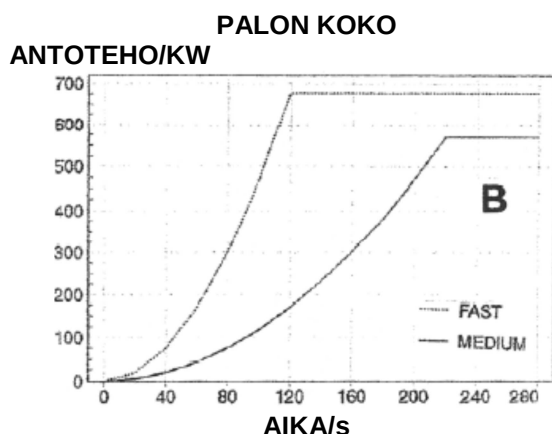
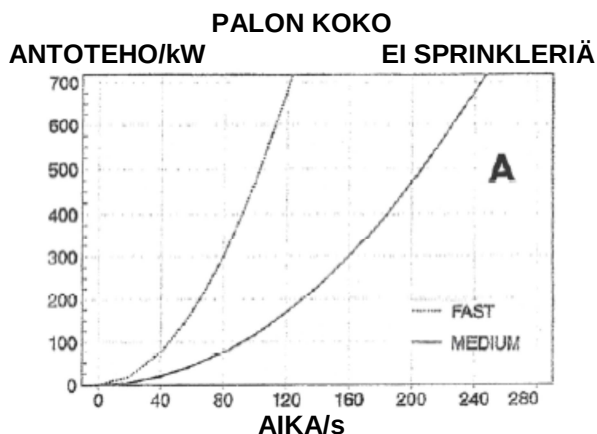
Tässä lasketaan palovirta ja CO-pitoisuus huoneelle, jonka pinta-ala on 20, 50 tai 100 m² ja korkeus 3 m. Palon oletetaan kasvavan NFPA:n Medium- ja Fast-nopeuksilla. Palo on lattian tasossa, ja palavaa polttoainekiloa kohti oletetaan muodostuvan 30 MJ energiaa.

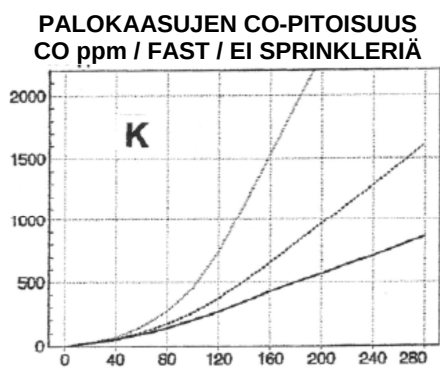
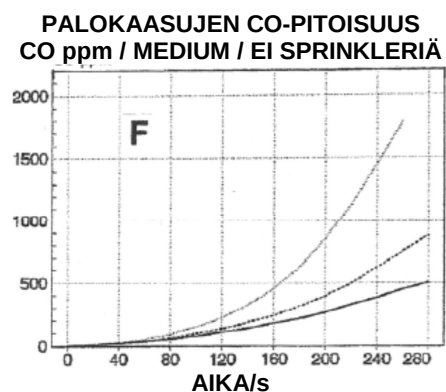
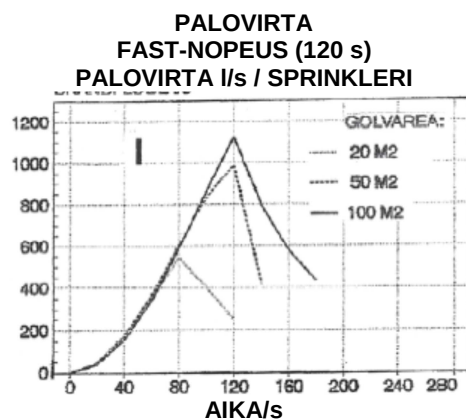
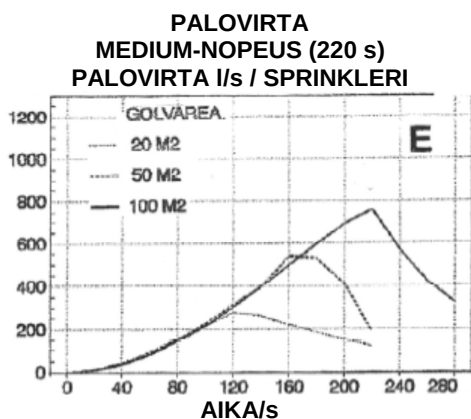
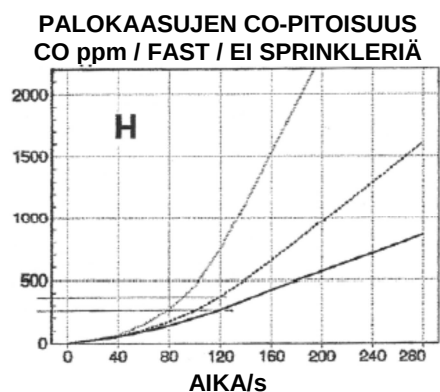
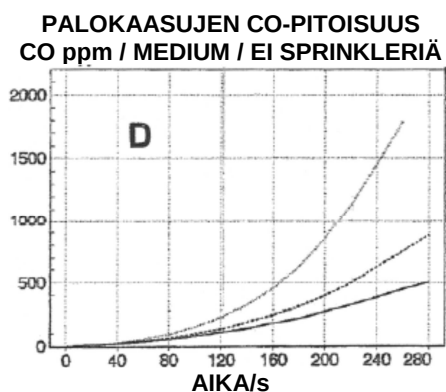
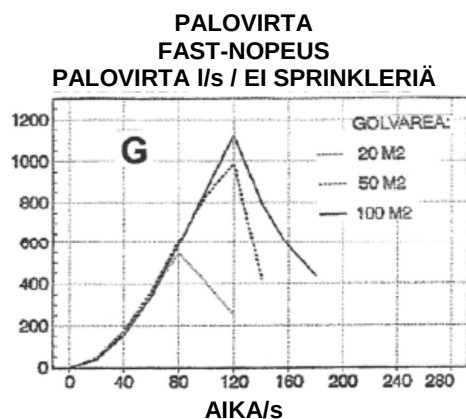
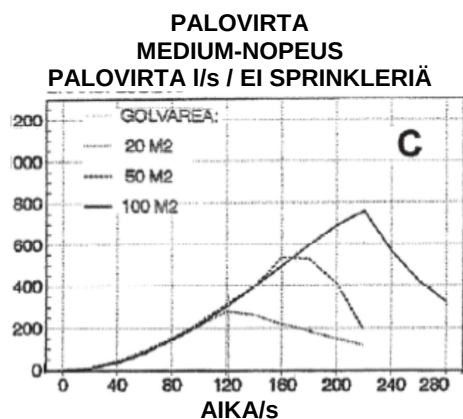
Medium-nopeudella sprinkleri laukeaa 220 sekunnin ja Fast-nopeudella 120 sekunnin kuluttua. Sprinklerin laukaisun jälkeen palo jatkuu samalla teholla. RTI-arvo on 50 m^{0,5} s^{0,5} (RTI, katso 14.2.2).

Palokaasujen CO-pitoisuuden laskennassa oletetaan, että kutakin palavaa polttoainekiloa kohti muodostuu 0,06 kg CO. Heikosti ilmaa saavassa palossa (poorly ventilated fire, kytevä palo palovirran maksimin jälkeen) CO:ta saattaa muodostua huomattavasti enemmän.

Huomaa, että palovirran käyrät ovat samanlaiset sprinklerin käytöstä riippumatta. Tämä johtuu siitä, että palovirta saavuttaa maksimin juuri ennen sprinklerin laukeamista.

CO-pitoisuus nousee nopeasti sen jälkeen, kun palovirta on ohittanut maksimin.





Kuva 12.3.5:2 Kuvat A–K

Laskentaesimerkki 3 – palovirran maksimi, sprinkleri / ei sprinkleriä

Tässä lasketaan palovirran maksimi huoneessa, jonka pinta-ala on 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 tai 250 m² ja korkeus 3 m, 4 m tai 6 m. Palon oletetaan kasvavan NFPA-nopeuksilla Medium ja Fast.

Kun sprinkleri on lauennut, palon intensiteetin oletetaan pienenevän eksponentiaalisesti ajan funktiona.

Sprinklerin laukeamisajat on laskettu Hazard-paketin DETACT-ohjelmalla määrittämällä alkuarvoiksi sprinklerien paikat, palon koko, huonekorkeus sekä RTI-arvo.

Edellytykset

- Korkeus sprinkleriin 3, 4 tai 6 m
- Pluumiakselin ja sprinkleripään välinen etäisyys 2,5 m
- Lämpötila, jossa sprinkleri laukeaa 71 °C
- RTI-arvo 50

Saadaan seuraavat ajat

Medium

- | | | | |
|-----------|-----|-------|-------------------|
| • Korkeus | 3 m | 210 s | palon alkamisesta |
| • - " - | 4 m | 270 s | - " - |
| • - " - | 6 m | 360 s | - " - |

Fast

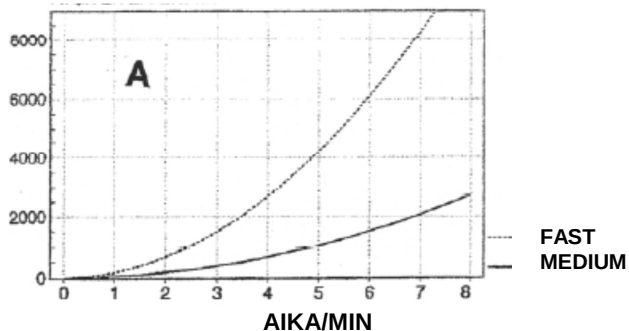
- | | | | |
|-----------|-----|-------|-------------------|
| • Korkeus | 3 m | 120 s | palon alkamisesta |
| • - " - | 4 m | 150 s | - " - |
| • - " - | 6 m | 180 s | - " - |

Huomaa, että palovirran maksimi saavutetaan ensin suuremmissa huoneissa, tässä tapauksessa huonekorkeuden ollessa 3 m ja pinta-alan ollessa 90 m² Medium-nopeudella ja 60 m² Fast-nopeudella. Tämä on otettava huomioon arvioitaessa riskiä palokaasun leviämisenle tuuletusjärjestelmän kautta.

Ei voida suoraan olettaa, että palokaasun leviämisenriski häviää, jos rakennelma varustetaan sprinklerijärjestelmällä.

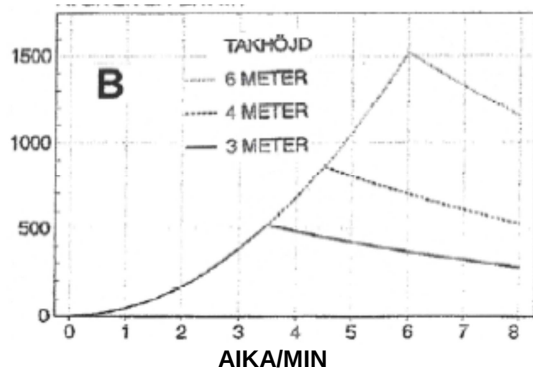
**EI SPRINKLERIÄ
PALON KOKO**

ANTOTEHO / KW



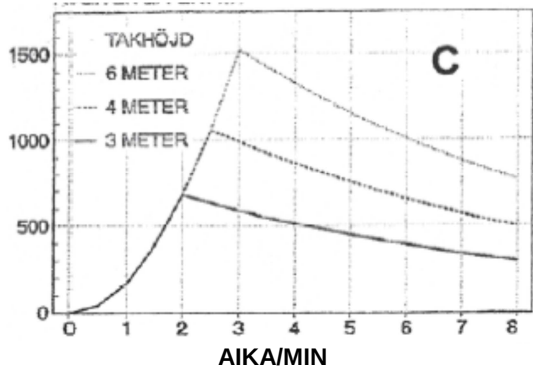
**SPRINKLERI – MEDIUM
PALON KOKO**

ANTOTEHO/KW



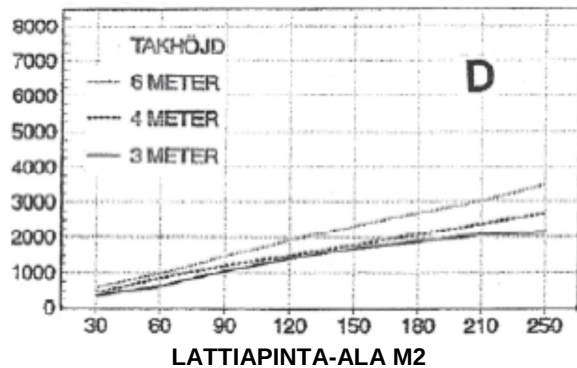
**SPRINKLERI – FAST
PALON KOKO**

ANTOTEHO/KW

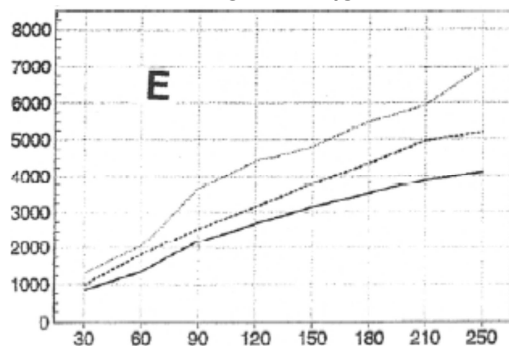


**MAKSIMIPALOVIRTA
EI SPRINKLERIÄ – MEDIUM**

PALOVIRTA 1/s

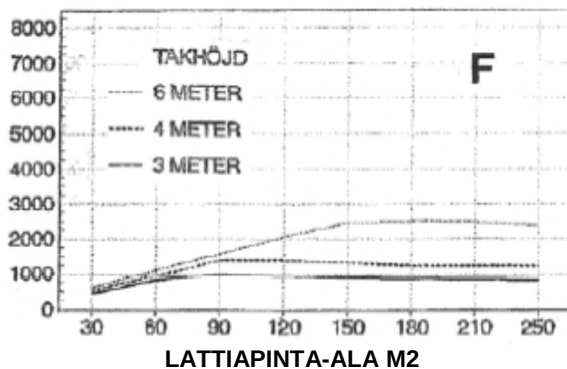


PALOVIRTA 1/s



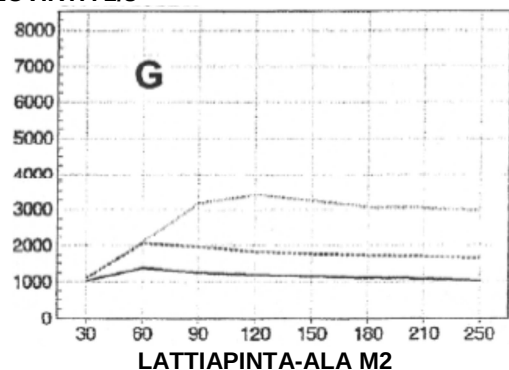
**LATTIAPINTA-ALA M2
MAKSIMIPALOVIRTA
SPRINKLERI – MEDIUM**

PALOVIRTA 1/s



FAST

PALOVIRTA 1/s



Kuva 12.3.5:3 Kuvat A–G

Laskentaesimerkki 4 – palovirta yms. – NFPA verrattuna oletettuun palon kulkua

Tässä esimerkissä lasketaan palovirta, palokaasun lämpötila, palokaasuton korkeus ja happipitoisuus käyttämällä osittain NFPA Medium -nopeudella kasvavaa paloa, osittain oletettua luonnollisen sänkypalon kulkua.

Palohuoneen happipitoisuuden lasku ei laskelmissa vaikuta palovirran maksimiarvoihin, vaan oletetaan, että maksimiarvot saavutetaan, ennen kuin happipitoisuus saavuttaa kriittisen rajan.

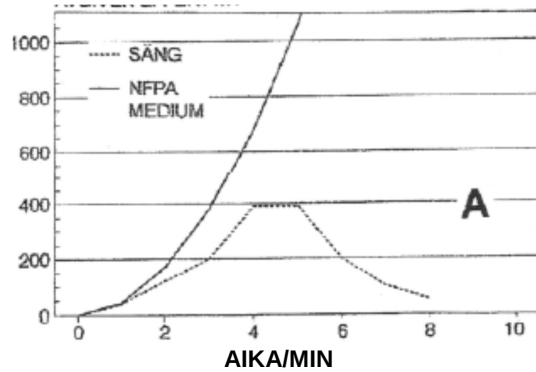
Kuvassa A esitetään laskelmissa käytettävät palamiskäyrät. Sänkypalon koko nähdään palamiskäyrien leikkauskohdasta, joka esitetään kuvassa B.

Laskelmissa odotetaan varovasti, että palo tukahtuu, kun palokaasujen happipitoisuus saavuttaa arvon 12–15 %. Kun palo tukahtuu, lämpötila tasaantuu tai laskee tasolle 125–175 °C. Tämä koskee sekä Medium-käyrää että oletettua palamiskäyrää (vertaa kuvia C ja D).

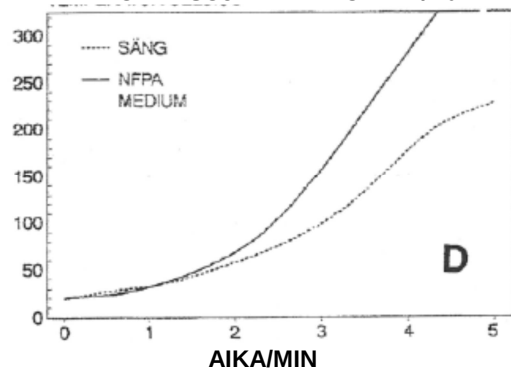
Kuvassa D lämpötilakäyrät jatkavat kasvuaan tasoittumatta tai laskematta. Kuten edellä todettiin, tämä johtuu siitä, että DSLAYV:ssä palo ”elää omaa elämäänsä”.

Palovirran maksimi (kuva F) saadaan odotetusti hetkellä, jona palokaasukerros saavuttaa lattian tason (kuva E) noin 3 minuutin kuluttua (NFPA Medium) ja vähän myöhemmin oletetulla palamiskäyrällä (hiukan pienempi tehotaso, katso kuva A).

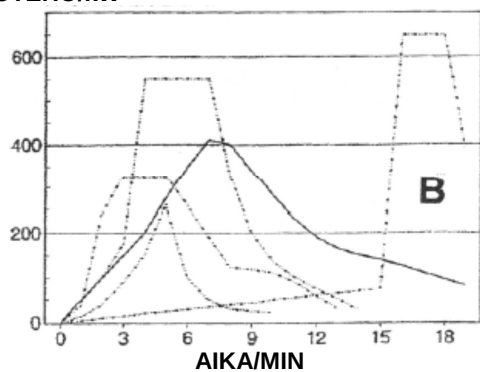
**LASKELMISSA KÄYTETTY PALON KOKO
ANTOTEHO/kW**



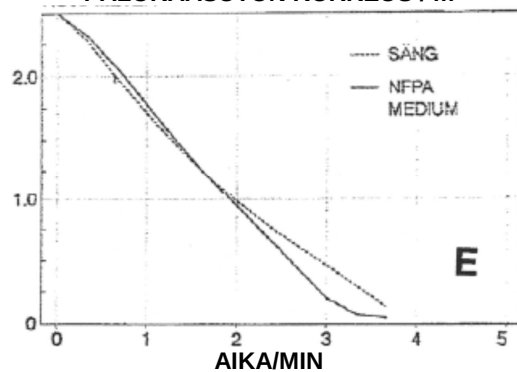
PALOKAASUJEN LÄMPÖTILA / °C



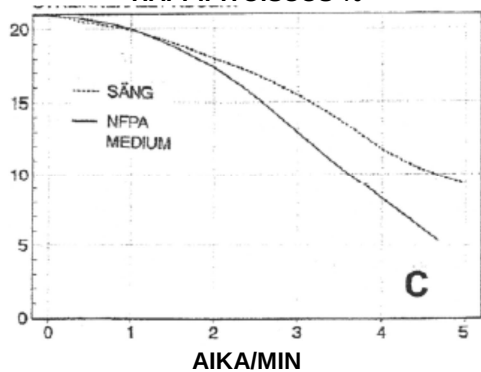
**ERITYYPPISIÄ SÄNKYPALOJA
ANTOTEHO/kW**



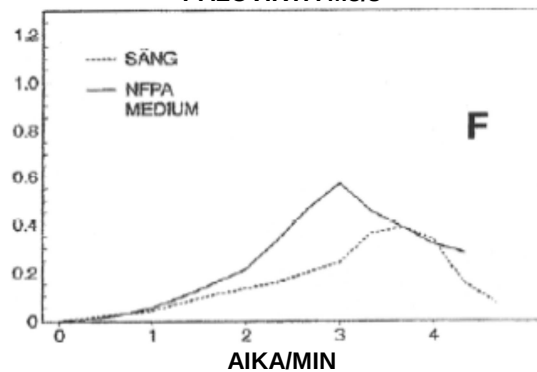
PALOKAASUTON KORKEUS / m



HAPPIPITOISUUS %



PALOVIRTA M3/s



Kuva 12.3.5:4 Kuvat A–F

Laskentaesimerkki 5 – palohuone, jossa on vuotorako / pulssimainen palo

Palohuoneessa, jonka pinta-ala on 100 m^2 , on $3,0 \text{ cm:n}$ rako lattian ja katon välissä. Huoneessa on ilmanvaihtojärjestelmä, jonka kapasiteetti on 500 l/s ja jossa tuuletusyksikkö on asennettu kattoon. Painehäviöksi yksikön yli on asetettu 100 Pa .

DSLAYV:llä tehdään laskelma ”lähes suljetulle” huoneelle, jossa palon voimakkuuden oletetaan pienenevän palokaasujen happipitoisuuden vähetessä. Voimakkuus kasvaa uudelleen, kun happipitoisuus huoneessa kasvaa. Laskelmissa oletetaan kaksi tällaista pulssia.

Tehtävät laskelmat ovat kahden pulssin antoteho (kuva A), palokaasuton korkeus (kuva B), palokaasun lämpötila (kuva C), palovirta (kuva D) ja happipitoisuus (kuva E).

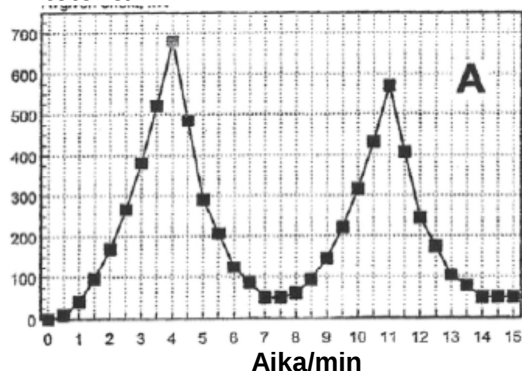
Palovirran maksimi saavutetaan noin 4 minuutissa, kun happipitoisuus on noin 14 %.

Paloteho ja lämpötila laskevat palohuoneessa ja huoneen alaosaan muodostuu alipaine. Tuloksena huoneeseen virtaa happipitoista ilmaa ja noin 7,5 minuutin jälkeen paloteho alkaa taas kasvaa. Samalla palovirta pienentää alipainetta, ohittaa nollapaineen ja nousee uuteen maksimiin (ensimmäistä hiukan pienempään) noin 10,5 minuutin jälkeen, kun happipitoisuus on noin 15 %.

Välillä 4–8 minuuttia happipitoisuus kasvaa 14:sta noin 19 %:iin.

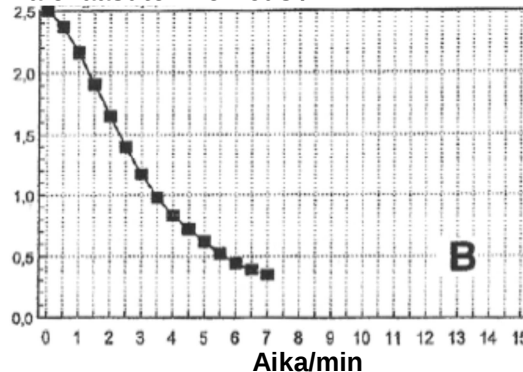
Palovirran uuden maksimin (noin 10,5 minuuttia) jälkeen palo pienenee uudelleen samalla tavalla kuin ensimmäisen pulssin jälkeen.

Antoteho/kW

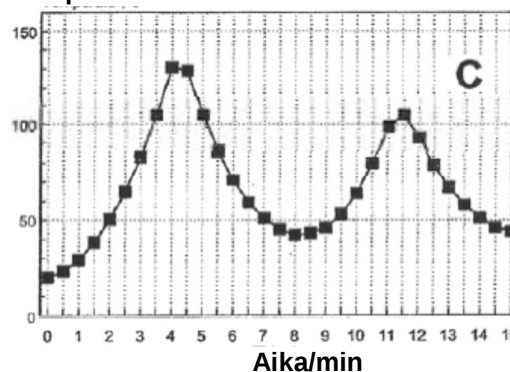


Kuva 12.3.5:5 Kuvat A–E

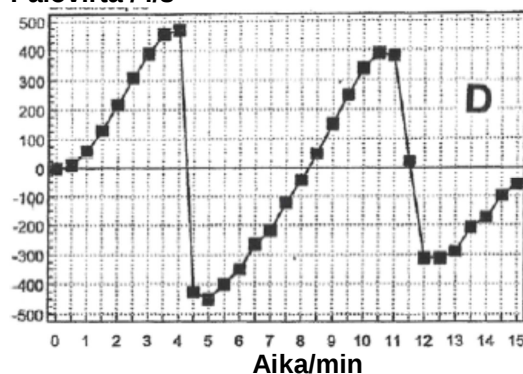
Palokaasuton korkeus / m



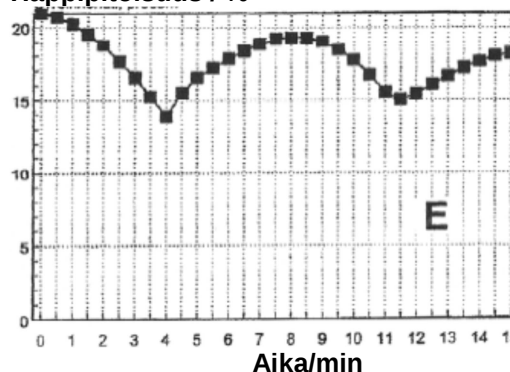
Lämpötila/°C



Palovirta / l/s



Happipitoisuus / %



**Laskentaesimerkki 13 –palovirta
kellaritiloissa, ei sprinkleriä, kylmä ja
lämmin palokaasu**

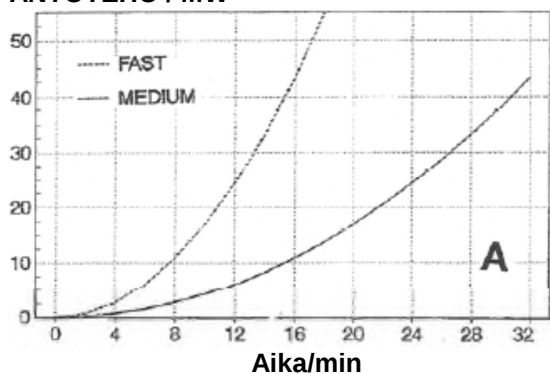
Palon kasvun oletetaan noudattelevan NFPA:n käyriä Medium ja Fast. Paloja ei sammuteta sprinklerillä.

Laskennassa huonekorkeus on 3 m. Lattiapinta-ala vaihtelee seuraavasti:

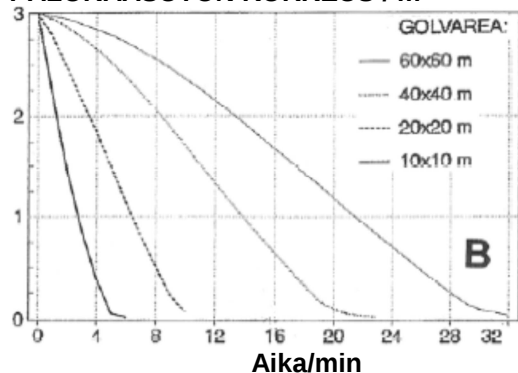
- 10 x 10 metriä
- 20 x 20 metriä
- 40 x 40 metriä
- 60 x 60 metriä

Laskelmissa tila oletetaan ”lähes suljetuksi”.

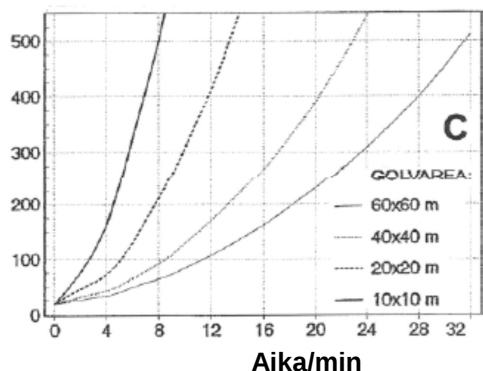
**PALON TUULETUS KELLARITILASSA
PALON KOKO (EI SPRINKLERIÄ)
ANTOTEHO / MW**



**NFPA MEDIUM -KASVUKÄYRÄ
PALOKAASUTON KORKEUS / m**

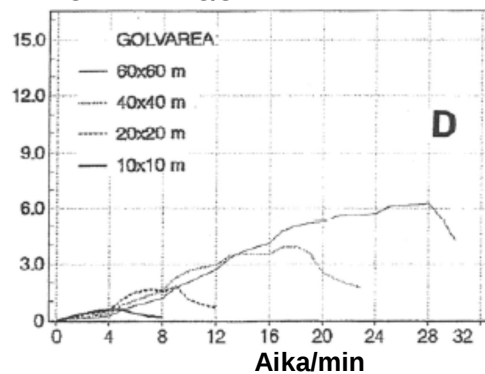


PALOKAASUKERROKSEN LÄMPÖTILA / °C

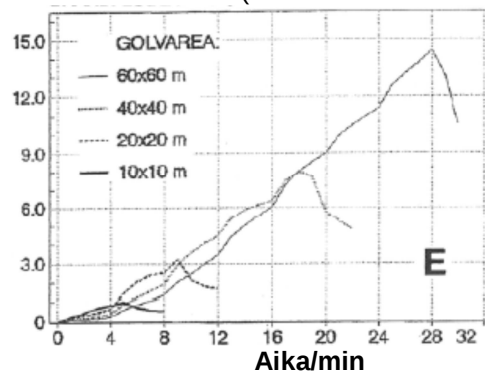


Kuva 12.3.5:6 Kuvat A–F

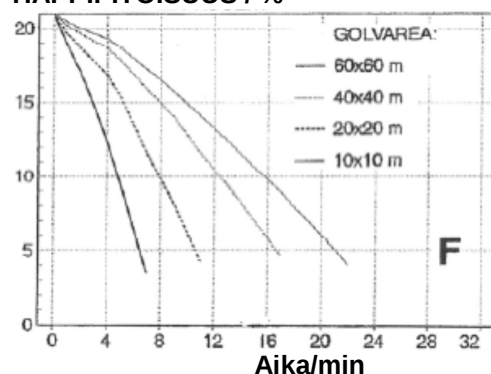
PALOVIRTA M3/s



PALOVIRTA M3/s (LÄMPIMÄT PALOKAASUT)



HAPPIPITOISUUS / %



Kuvassa A esitetään palon kasvunopeudet Fast ja Medium.

Seuraavat kuvat perustuvat Medium-kasvunopeuteen. Kuvassa B esitetään neljän tilan palokaasuton korkeus ja kuvassa C palokaasukerroksen keskilämpötila.

Kuvassa D esitetään DSLAYV:n normaalitavalla tapahtuva palo, eli palokaasut ovat ”kylmiä” – palovirta virtaa ulos lattiatasolla, ja huoneen lämpötila on normaali. Kuvassa E sen sijaan esitetään epätavallinen DSLAYV-kuvaus, jossa palokaasut ovat ”lämpimiä” – palovirta lähtee ylemmästä palokaasukerroksesta, jonka lämpötila esitetään kuvassa C. Tämä laskentamalli voi toimia ohjenuorana määrittäessä kellaritilojen palokaasutuuletusta.

Kuvassa F esitetään palohuoneen happipitoisuus edellä hahmotellun palon aikana.

Laskentaesimerkki 14 – palovirta kellaritiloissa, sprinklerisammutus

Esimerkki on periaatteessa kuten 13, mutta palot sammutetaan. Sprinklerin laukeamisajan laskennassa on käytetty seuraavia arvoja:

- pluumiakselin etäisyys sprinkleripäästä 2,5 m
- sprinklerin laukeamislämpötila 68 °C

Medium-kasvunopeudella sprinkleri laukeaa 5 minuutin (Fast-nopeudella 3 minuutin) jälkeen.

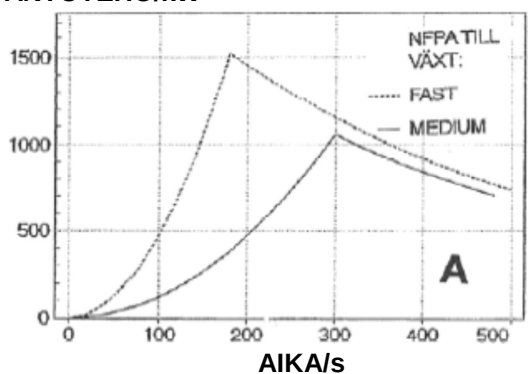
Palojen oletetaan noudattelevan NFPA:n kasvukäyriä Medium ja Fast.

Laskennassa huonekorkeus on 3 m. Lattiapinta-
alat ovat seuraavasti:

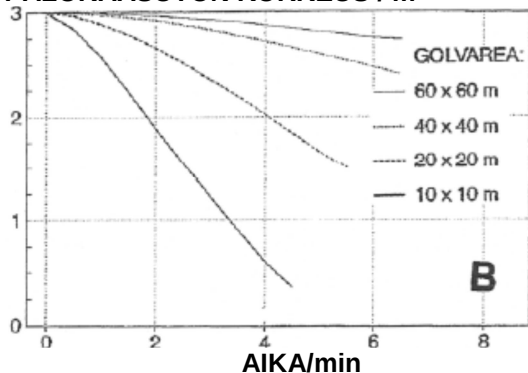
- 10 x 10 metriä
- 20 x 20 metriä
- 40 x 40 metriä
- 60 x 60 metriä

Laskelmissa tila katsotaan ”lähes suljetuksi”.

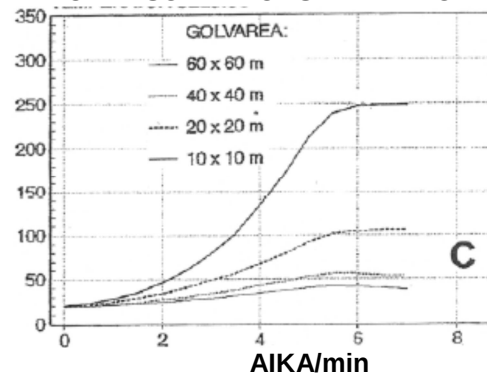
PALON TUULETUS KELLARITILOISSA PALON KOKO (SPRINKLERI) ANTOTEHO/kW



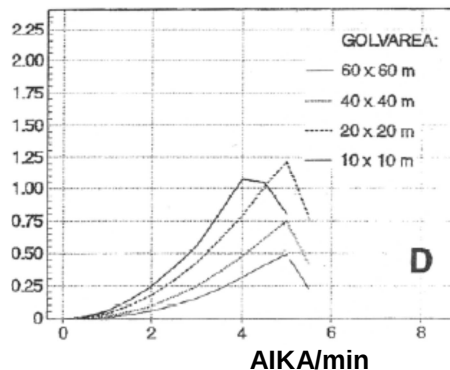
NFPA MEDIUM -KASVUKÄYRÄ PALOKAASUTON KORKEUS / m



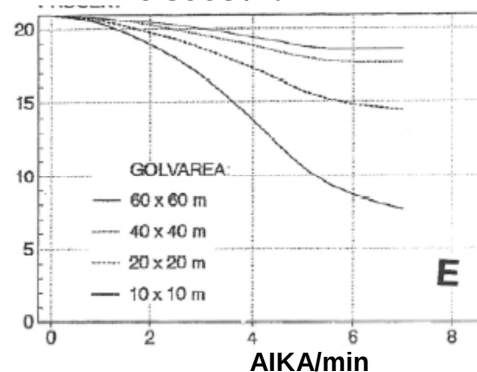
PALOKAASUKERROKSEN LÄMPÖTILA / °C



PALOVIRTA M3/s



HAPPIPITOISUUS / %



Kuva 12.3.5:7 Kuvat A–E

Kuvassa A esitetään kasvunopeudet Fast ja Medium.

Seuraavissa kuvissa kasvunopeuden oletetaan olevan Medium. Kuvassa B esitetään palokaasuton korkeus neljässä rakennuksessa ja kuvassa C palokaasukerroksen keskilämpötila.

Kuvassa D esitetään palovirta, mutta tässä esimerkissä esitetään vain ”normaali” (”kylmä”) palovirta, sillä sprinklerisammutuksen vuoksi palokaasukerroksen keskilämpötila on matala.

Kuvassa E esitetään happipitoisuus palo-huoneessa.

**Laskentaesimerkki 15 – laskettu
paineenkasvu, kun palohuoneen ovi käytävään
on auki tai kiinni**

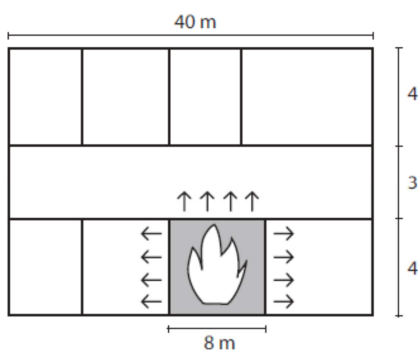
Palohuoneen seinien kautta tapahtuvaksi vuodon 50 Pa:n paine-erossa lasketaan olevan noin 50 l/s, kun ovi on kiinni (kuva 12.3.5:8). Jos ovi on auki (mutta muut käytävän ovet kiinni), myös vuoto käytävän seinien kautta otetaan huomioon ja kokonaisvuoto on noin 200 l/s (kuva 12.3.5:9).

Seuraavassa laskelmassa palohuoneen ovi on kiinni kuvan 12.3.5:8 mukaisesti.

- Palohuoneen pinta-ala on 4 x 8 m ja korkeus 2,5 m.
- Käytävän pituus on 40 m ja leveys 3 m.
- Palon kasvunopeus noudattaa NFPA Medium -käyrää.
- Palohuone on suljettu lukuun ottamatta rakoa lattia-
stakattoon.
- Raon kautta tapahtuvan vuodon virtauskerroin on 0,8.

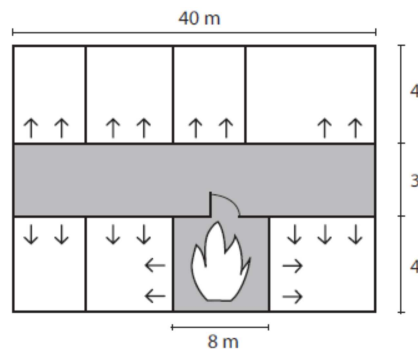
Raon leveydeksi oletetaan

- | | | | |
|---------|--------------------|---------|---------|
| • 2 mm | mikä vastaa vuotoa | 36 l/s | (50 Pa) |
| • 4 mm | " | 72 l/s | " |
| • 8 mm | " | 144 l/s | " |
| • 16 mm | " | 288 l/s | " |



Kuva 12.3.5:8

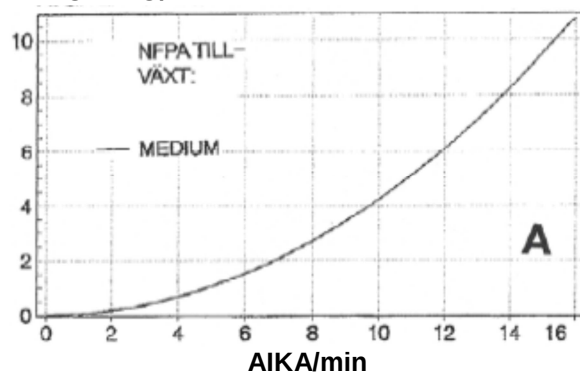
Palohuoneen sijainti käytävässä, ovi kiinni



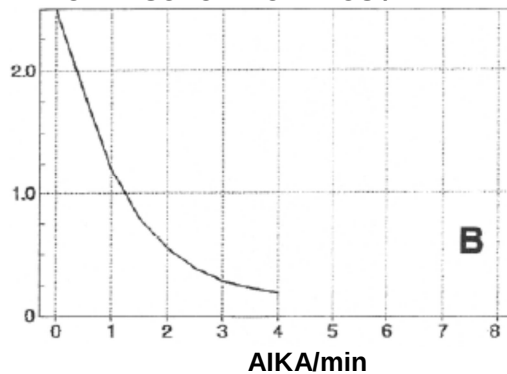
Kuva 12.3.5:9

Palohuoneen sijainti käytävässä, ovi auki

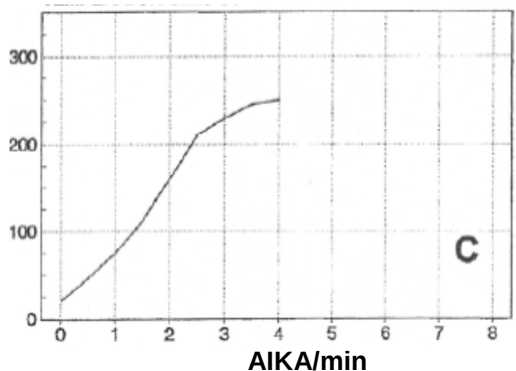
**LASKETTU PAINEEN KASVU
HUONEEN KOKO: 4 x 8 x 2,5 m
SULJETTU HUONE
ANTOTEHO/MW**



PALOKAASUTON KORKEUS / m

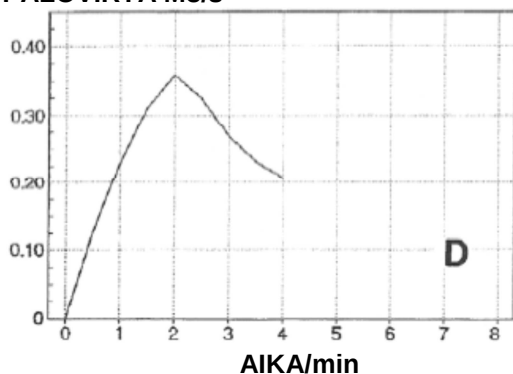


PALOKAASUKERROKSEN LÄMPÖTILA / °C

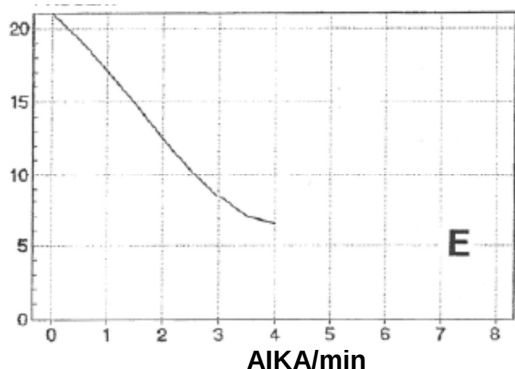


PALOVIRTA (LÄMPIMÄT PALOKAASUT)

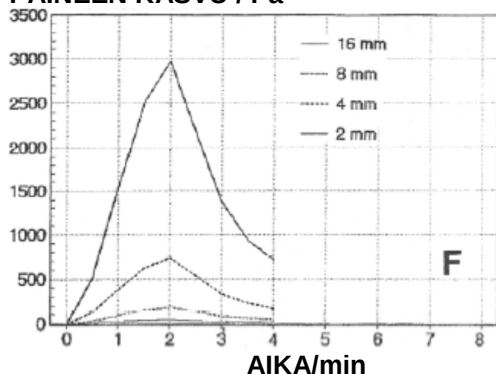
PALOVIRTA M3/s



HAPPIPITOISUUS / %



PAINEEN KASVU / Pa



Kuva 12.3.5:10 Kuvat A–F

Kuvassa A esitetään NFPA:n Medium-kasvukäyrän mukainen antoteho.

Kuvissa B ja C esitetään palokaasuton korkeus ja palokaasukerroksen lämpötila.

Kuvassa D esitetään palovirta (lämpimät palokaasut). Maksimi saavutetaan noin 2 minuutin jälkeen, kun happipitoisuus on noin 12 % (kuva E).

Paine työntää palovirran ulos raon kautta. Kuvassa F esitetään erikokoisille raoille lasketut palopaineet. Maksimipaine on noin 3 000 Pa pienimmällä 2 mm:n raolla (paine todennäköisesti ylittää seinien kestävyys).

Kun rako on kaksi kertaa tämän kokoinen, palopaine pienenee noin neljännekseen.

Tulokset 8 ja 16 mm:n raoille vastaavat suunnilleen sitä, että palohuoneen ovi käytävään on auki ja vuotoa tapahtuu myös käytävän seinien läpi.

Vastaavan tilanteen voidaan olettaa syntyvän asuntopalossa, kun palovirta määritetään sille huoneelle, jossa palo alkoi. Vuoto voidaan määrittää joko palohuoneelle tai, jos huoneen oven oletetaan olevan auki, koko asunnolle.

12.3.6 Palovirtalaskelmien yleinen kaava

Lars Jensen teki 90-luvun lopussa Bengt Hägglundin käsikirjassa *Brandskyddsteknik för ventilationssystem* julkaistujen laskelmien perusteella regressioanalyysin saadakseen yksinkertaistetun laskentakaavan palovirralle.

Hän päätyi seuraavaan kaavaan:

$$q_b = 0,28 \cdot \alpha^{0,43} \cdot V^{0,53} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

jossa

q_b = palovirta

α = palon kehitysnopeus

V = huoneen tilavuus

HUOM!

Tässä kaavassa ja Hägglundin DSLAYV-laskelmissa α ilmaistaan yksikössä kW/s^2 .

Lars Jensenin raportissa (katso 12.4), sen yksikkönä on W/s^2 .

Karkeasti ottaen siis palovirran suuruus on verrannollinen palon kehitysnopeuden α neliöjuureen ja palohuoneen tilavuuden V neliöjuureen.

Huomaa, että tämä yksinkertaistettu kaava pätee vain Hägglundin edellä mainitussa käsikirjassa käyttämissä olosuhteissa (katso 12.3.4).

Palovirta kasvaa palotehon myötä ja saavuttaa maksimin, kun palokaasu ulottuu lähelle lattian tasoa. Edellä esitetyllä kaavalla saadaan tämä maksimiarvo.

Kaava pätee huonekorkeudessa 2,5 m, kun lattiapinta-ala on 15–240 m^2 .

Nykyään käytettävissä on Lars Jensenin kehittämä, paljon parempi laskentamenetelmä, joka korvaa edellä esitetyn yleiskaavan. Laskentamenetelmä kuvataan seuraavassa luvussa.

12.4 Lars Jensenin laskentamenetelmä 2006

Professori Lars Jensen, LTH Installationsteknik, on laatinut loppuraportin *Skydd mot rökspridning via ventilationssystem med stoppade fläktar och förbigångar – riskbedömning och dimensionering, Brandforsk 313-001, rapporti TVIT-06/3003*.

Seuraavassa on tiivistelmä raportin luvusta 3.

12.4.1 Laskennallinen palotilanne

Jensenin raportin luku 3 käsittelee laskennallisia palotilanteita. Luvun tarkoituksena on määrittää laskennallinen palovirta sen mukaan, mitkä huoneessa olevat esineet voivat palaa. Palovirta voidaan laskea, kun kaasumassan teho palohuoneessa.

Laskelmien pohjaksi kirjoittaja on tutkinut 70:tä julkaisussa *Initial fires*, Särdaqvist, 1993 mainittua palotilannetta.

12.4.2 Kaksivyöhykemalli

Kaksivyöhykemallia, jossa huoneen tilavuus jaetaan ala- ja ylätilavuuteen, käytetään palon kulun simulointiin palohuoneessa, jossa ei ole suuria aukkoja, kuten ikkunoita tai ovia.

Malli perustuu simulointimalliin, joka kuvataan julkaisussa *Simulating fires in natural and forced ventilated enclosures*, Hägglund (1986). Jensenin raportissa mallia on hiukan yksinkertaistettu mitä tulee paine-eroon ympäristön kanssa, aukkoihin ja ilmastointiin.

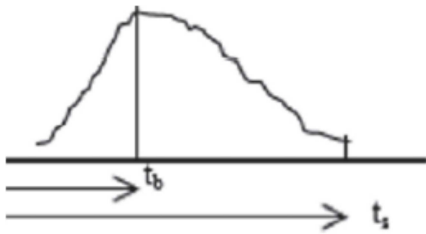
Palohuoneen ja ympäristön välinen paine-ero voi olla enintään muutama tuhat Pascalia, eikä se vaikuta paloon ja palovirtaan.

Oletuksena on myös, ettei huoneeseen tule virtausta.

Huomaa kuitenkin, että joissakin olosuhteissa palovirta voi olla negatiivinen, mikä johtaa tulovirtaukseen. Tämä tulipalon kulun osa ei kuitenkaan ole kiinnostava, vaan meitä kiinnostaa vain palovirran suurin arvo.

12.4.3 Simulointitapaus, jossa mallia sovelletaan palon αt^2 -kulkuun

Kaksivyöhykemallia simuloitiin erilaisilla αt^2 -paloilla käyttämällä eri lattiapinta-aloja, huonekorkeuksia ja ilmanpoiston (palovirran poiston) jakosuhteita. Tavoitteena oli määrittää näiden parametrien ja laskennallisen palovirran q_b välinen yhteys käytettäessä määritettyä paloaikaa t_b ja ylävyöhykkeen lämpötilaa, niin sanottua palolämpötilaa T_b . Teoreettinen maksimipaloaika t_s voidaan määrittää laskemalla, milloin kaikki palohuoneessa oleva happi on kulutettu (kuva 12.4.3:1).



Kuva 12.4.3:1

Simulointi alkaa, kun ylavyöhykkeen korkeus on 1 mm, ja päättyy, kun alavyöhykkeen korkeus on 1 mm. Simuloinnissa määritetään suurin palovirta sekä siihen liittyvä paloaika, ylavyöhykkeen lämpötila, palokaasukerroksen etäisyys lattiasta ja paloteho.

Laskelmat tehtiin kaikille seuraavien neljän parametrin yhdistelmälle:

- Kasvunopeus
 $\alpha \text{ W/s}^2 = 2,93 \{ [1 \ 2 \ 4 \ 8 \ 16 \ 32 \ 48 \ 64] \}$
- Lattiapinta-ala A
 $\text{m}^2 = [10 \ 20 \ 40 \ 60 \ 80 \ 100 \ 125 \ 150 \ 175 \ 200]$
- Huonekorkeus h
 $\text{m} = [2,4 \ 2,7 \ 3,0 \ 3,3 \ 3,6]$
- Ilmanpoistosuhde u
 $= [0,1 \ 0,2 \ 0,5 \ 0,8 \ 0,9]$

Parametrin u arvo ilmaisee, miten suuri osa ilmanpoistosta tapahtuu lattialla.

Eri kasvunopeuksilla (8 arvoa), lattiapinta-aloille (10), huonekorkeuksilla (5) ja ilmanpoitosuhteilla (5) saadaan laskettaviksi 2 000 yhdistelmää.

Kaikkien palon t^2 -muotoisen kulun simulointien tuloksena raportti osoittaa, että niiden laskennallisten paloaikojen t_b keskiarvo, jossa palovirta saavuttaa maksimiarvon, on noin 0,45 kertaa teoreettisen maksimipaloajan t_s suuruinen. Teoreettinen maksimipaloaika on aika, jona kaikki tilassa oleva happi on kulutettu.

12.4.4 Palotehon kehitys

Palotehon muuttumista ajan funktiona tutkittiin erityisesti palon kulun alkuosassa maksimitheoon saakka. Tämä tehtiin selvittämällä, onko tehon kasvu tyyppiä αt^2 , mikä on tavallinen tapa kuvata palon kehitystä, kun sekä paloteho että palotehon muutos kasvavat monotonisesti.

Raportissa osoitetaan, että 34 tapauksessa 70:stä paloteho ei kasva monotonisesti, vaan kehityksessä on pienenevä ajanjakso. Vain 7 tapauksista on monotonisia sekä palotehon että palotehon muutoksen suhteen. Lopuissa 29 tapauksessa paloteho kasvaa monotonisesti, palotehon muutos sen sijaan ei.

Näiden tuloksien seurauksena Jensen käyttää raportissa sekä NFPA:n mukaista varovaista tehonkasvua t^2 että Jensenin raportin luvussa 3 esitetyn laskentamenetelmän mukaista tehonkasvua t^4 .

Laskentamenetelmällä voidaan laskea palovirta q_b , paloaika t_b (maksimiin asti) ja palolämpötila T_b (maksimiin asti) (katso laskentauseke 12.5).

12.4.5 Palon kasvu

Huoneen ilmamäärä rajoittaa palon kasvua, kun palon ilmatilavuuden tarve kasvaa huoneen tilavuutta suuremmaksi, edellyttäen, ettei ympäristöstä virtaa sisään ilmaa. Tämä tarkoittaa, että ikkunat ja ovat kiinni ja ehjiä. Tässä on kyseessä yliarviointi, koska huoneilma lämpenee palon aikana, joten käytettävissä oleva happimäärä vähenee.

12.4.6 Paloaika

Mahdollinen paloaika ennen palon tukahtumista, voidaan arvioida vertaamalla paloilman tarvetta huoneen tilavuuteen. Paloajan avulla voidaan puolestaan määrittää maksimipaloteho kyseisen ajan kuluessa. Laskennallista palotehoa voidaan siis käyttää laskennallisen palovirran määrittämiseen.

Raportissa esitettiin korjaus, joka liittyy ikkunan rikkoutumiseen (lämpösäteilyn vuoksi) αt^2 -muotoisessa palossa. Valittujen syöttötietojen avulla voidaan määrittää, ettei palohuoneen paine ehdi purkautua romahtaneen ikkunan vuoksi ennen laskennallisen palovirran kehittymistä.

Kirjoittaja on tutkinut ja kvantifioinut tarkasti paloajan eli ajan siihen, että palovirta saavuttaa maksimiarvonsa (ennen kuin se alkaa pienentyä hapen puutteen vuoksi).

12.4.7 Herkkyysanalyysi

Kaksivyöhykemallin avulla tutkittiin, miten seuraavat yhdeksän parametria vaikuttavat laskennalliseen palovirtaan:

- huoneen lattiapinta-ala
- huonekorkeus
- seinäkerroin
- alavyöhykkeen ilmanpoisto-osuus
- pintamateriaalin paksuus
- pintamateriaalin tyyppi
- säteilyn osuus (miten suuri osa palotehosta häviää ympäristöön)
- palonkasvuparametri [$Q(t) = \alpha_2 t^2$]
- palofunktioparametri [$Q(t) = \alpha_n t^n$]

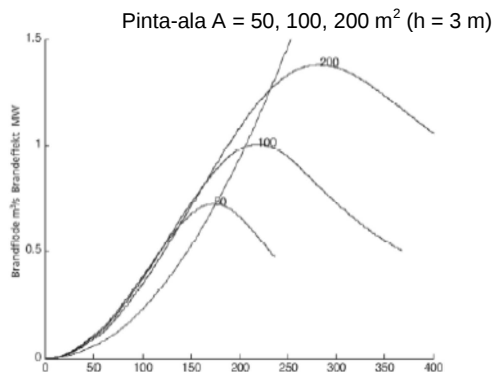
Seinäkerroin ilmaisee, miten suuri huoneen suhteellinen seinäpinta-ala on nelikulmaisen huoneen seinäpinta-alaan (= 1) verrattuna. Arvo 0 tarkoittaa, että seinäpinta-alat jätetään huomiotta. Arvo 2 tarkoittaa, että seinäpinta-alat kaksinkertaistetaan. Tämä voidaan tulkita niin, että 100 m²:n huone koostuu neljästä 25 m²:n huoneesta.

Alavyöhykkeen ilmanpoisto-osuus ilmaisee, miten suuri osa palohuoneesta lähtevästä laajenemisvirrasta on peräisin alavyöhykkeestä. Arvo 1 tarkoittaa, että kaikki ilmanpoisto tapahtuu alavyöhykkeestä, ja arvo 0, että kaikki ilmanpoisto tapahtuu ylävyöhykkeestä.

Pintamateriaalin paksuus ja *pintamateriaalin tyyppi* vaikuttavat palohuoneen vaipan eristykseen ja lämpökapasiteettiin.

Kunkin parametrin herkkyyshanalyysi tuottaa siis 9 analyysitapausta. Kukin analyysitapausta selitetään kaaviomuodossa käyttämällä palovirtakäyriä eri parametriarvoille sekä käyrää paloteholla $\alpha = 23,44 \text{ W/s}^2$. Kaavioista käy ilmi myös paloaika.

Lattiapinta-ala – parametriherkkyys



Kuva 12.4.7:1

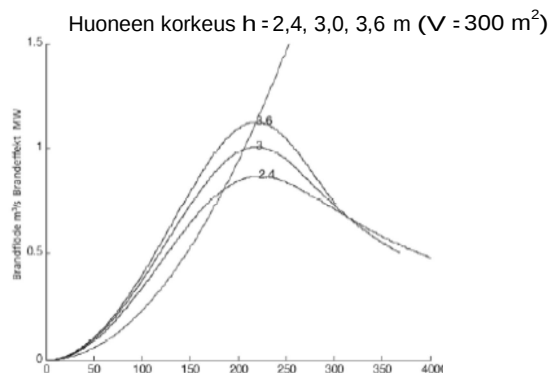
Palovirta ja paloteho eri lattiapinta-aloilla

Käyrät osoittavat, että lattiapinta-alalla on hyvin suuri vaikutus laskennalliseen palovirtaan. Kun paloilmaa on saatavilla enemmän, paloteho on suurempi ja palovirta on suoraan verrannollinen konvektiotehoon (palokaasukerrokseen tulevaan tehoon). Luvut osoittavat, että pinta-alan nelinkertaistuminen (eli huoneen tilavuuden nelinkertaistuminen) lähes kaksinkertaistaa palovirran.

Paloaika t_b voidaan lukea kuvasta 12.4.7:1 tai laskea luvun 12.5 kaavasta.

Teoreettiset maksimipaloajat t_s ovat 271, 342 ja 431 s.

Parametriherkkyys – huonekorkeus



Kuva 12.4.7:2

Palovirta ja paloteho eri huonekorkeuksilla

Kuten edellisessäkin tapauksessa, huoneen tilavuuden kasvaminen kasvattaa myös palovirtaa.

Huoneen seinät – parametriherkkyys

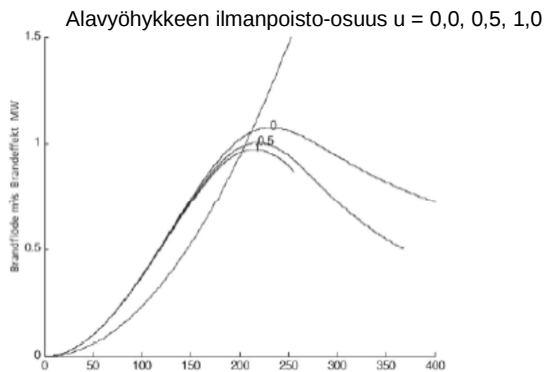
Seinäparametri määrittää, miten suuri seinäpinta-ala on neliömäiseen huoneeseen verrattuna. Arvo 0 tarkoittaa, että seinäpinta-alat jätetään huomiotta, arvo 1, että normaalit seinäpinta-alat otetaan huomioon, ja arvo 2, että seinäpinta-alat katsotaan kaksinkertaisiksi. Palovirtaan voi vaikuttaa muun muassa se, että kosketuspinta lisää jäähtymistä. Vaikutus palovirtaan on kuitenkin merkityksetön, joten sitä ei käsitellä tässä tiivistelmässä.

Ilmanpoisto-osuus – parametriherkkyys

Raportissa todetaan:

”Palohuoneen ilmanpoiston toteutustapa vaikuttaa tulipalon kulkuun. Jos ilmanpoisto tapahtuu vain huoneen yläosasta, osa palokaasukerroksen ilmasta poistetaan mutta alavyöhykkeen ilmaa ei. Happipitoista ilmaa ei poisteta, joten palo voi jatkaa pidempään. Käänteisessä tapauksessa, jossa ilmanpoisto tapahtuu vain huoneen alaosaan, palovirta työntää alavyöhykkeen happipitoisen ilman ulos, mikä lyhentää paloaikaa.”

Palovirta (m³/s) kuvataan yhdessä palotehon (MW) kanssa, kun alavyöhykkeen ilmanpoisto-osuus on 0, 0,5 tai 1. Kuvan 12.4.7:3 kolme tapausta osoittavat, että alavyöhykkeen ilmanpoisto-osuudella on tietty vaikutus laskennalliseen palovirtaan, joka pienenee alavyöhykkeen ilmanpoisto-osuuden kasvaessa. Huomaa, että kaikki kolme käyrää päättyvät, kun ylävyöhyke ulottaa lattiatasolle.”



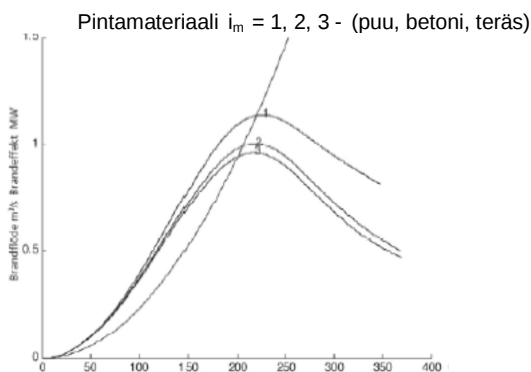
Kuva 12.4.7:3

Palovirta ja paloteho alavyöhykkeen eri ilmanpoisto-osuuksilla

Pintamateriaalin paksuus – parametriherkkyys

Alkavan palon kulku on ajallisesti lyhyt rakennusten normaaliin lämmönsiirtoon verrattuna. Alkuvaihe vaikuttaa vain pieneen osaan seiniä, lattiaa tai kattoja. Siksi tämän parametrin vaikutus on niin pieni, että se voidaan jättää huomiotta.

Pintamateriaalin tyyppi – parametriherkkyys



Kuva 12.4.7:4

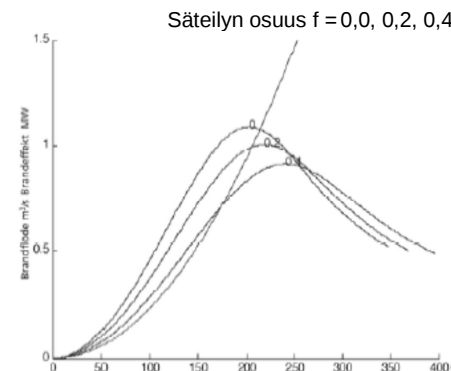
Palovirta ja paloteho eri pintamateriaaleilla

Huoneen pintojen jäähdytyskyky ja ominaisuudet vaikuttavat palovirtaan konkreettisesti. Analyysissä käsiteltiin kolmea materiaalia, puuta, betonia ja terästä. Yleisesti huomataan, että puu, jolla on merkittävästi heikompi lämmönjohtokyky ja hiukan pienempi lämmönvarauskyky, tuottaa suuremman palovirran (suurempi palotehon osa kaasukerrokseen). Jäähdytys siis heikkenee, kun vaippa eristää paremmin.

Säteilyn osuus – parametriherkkyys

Lainaus raportista:

”Paloteho voidaan jakaa pienempään säteilyosaan ja suurempaan konvektio-osaan. Kuvassa 12.4.7:5 esitetään palovirta (m^3/s) ja paloteho (MW) kaksivöhykemallissa, jossa säteilyn osuus on 0, 0,2 ja 0,4. Kolme mallia osoittavat, että säteilyn osuudella on tietty vaikutus laskennalliseen palovirtaan, sillä säteilyn lisääntyminen lisää suoraa jäähdytystä ympäröivien pintojen kautta.”

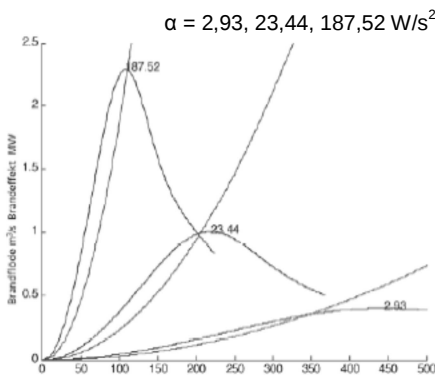


Kuva 12.4.7:5

Palovirta ja paloteho eri säteilyosuuksilla

Hägglundin 1986 verrattaessa huomataan, että keskimäärin 20 % johtuu liekistä tulevasta suorasta säteilystä. Voidaan olettaa, että raportin kolme analyysiarvoa johtuvat juuri liekin säteilystä. Raportissa mainittu ”suurempi konvektio-osa” siirtyy vain osittain ylempään kaasukerrokseen, sillä palohuoneen lattiassa, seinässä ja katossa tapahtuu säteily- ja konvektiohäviöitä.

αt^2 -palo – parametriherkkyys



Kuva 12.4.7:6

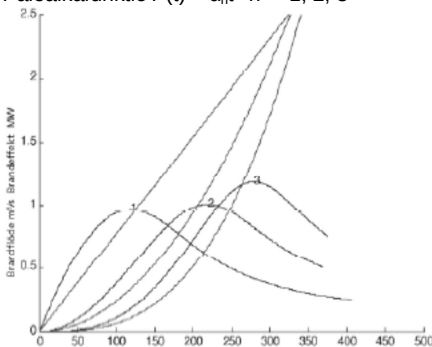
Palovirta ja paloteho eri palonkuluilla

Nopeasti kasvava palo voi saavuttaa suuren tehon, ennen kuin huoneen ilmatilavuus on käytetty. Mutta tämä tapahtuu paloajan kustannuksella – suuri teho tarkoittaa lyhyttä paloaikaa, jos palon syötearvot ovat muuten samat.

Kolme tapausta osoittavat, että palovirta on hyvin riippuvainen kasvunopeudesta.

αt^n -palo – parametriherkkyys

Paloaikafunktio $P(t) = \alpha_n t^n$ $n = 1, 2, 3$



Kuva 12.4.7:7

Palovirta ja paloteho eri palofunktioilla

Selvityksessä analysointiin kolme palofunktiota, joilla on eri aikaeksponentti n ja vakio α_n . Aikaeksponenteiksi valittiin 1, 2 ja 3, ja α_n -arvoa mukautettiin niin, että teoreettinen maksimipaloaika saadaan eksponentilla 2.

Näiden kolmen tilanteen palovirrat eivät juuri eroa toisistaan, etenkin eksponenttien 2 ja 1 tapauksessa. Tämä voidaan tulkita niin, että oletusta αt^2 -muotoisesta *palovirrasta* voidaan soveltaa normaalitapauksissa, vaikka tämä tutkimus osoittaaakin, että palon kulku usein poikkeaa αt^2 -mallista (katso edellä oleva kuvaus palotehon kehittymisestä).

12.4.8 Yhteenveto herkkyysanalyysistä

- Palovirta saavuttaa kaikissa tapauksissa maksimiarvon, ennen kuin ylävyöhyke ulottuu lattiatasolle.
- Siirtyminen kaksivyöhykemallista yksivyöhykemalliin tapahtuu kauan ennen teoreettista maksimipaloaikaa.
- Palovirta lähes kaksinkertaistuu huoneen tilavuuden nelinkertaistuessa.
- Huoneen seinäkertoimen muuttumisen vaikutus palovirtaan on merkityksetön.
- Ilmanpoiston korkeussuuntaisella sijainnilla on raportin mukaan pieni vaikutus palovirtaan.
- Palovirta heikkenee merkittävästi säteilyosan kasvaessa, mikä on luonnollista, koska yläkerrokseen siirtyy pienempi teho.
- Palovirta kasvaa voimakkaasti palon kasvunopeuden kasvaessa αt^2 -muotoisen *palon* tapauksessa. Samalla paloaika lyhenee ja palo etenee nopeammin.

12.4.9 α^2 -palomallin mukautus

Samaa yksinkertaista mallia on käytetty laskettaessa simuloituja arvoja, tulostietoja, ja eri parametrien tietojen kanssa syötetietoja.

Malli voidaan kirjoittaa yleisessä muodossa

$$y = f \alpha^a A^b h^c V^d u^e$$

jossa

f = vakio

α = palon kehitys W/s^2

A = palohuoneen pinta-ala m^2

h = palohuoneen korkeus m

V = palohuoneen tilavuus m^3

u = ulosvirtaus lattian tai katon kautta

Arvo y on jossain määrin simuloitu arvo laskennalliselle palovirralla sekä liittyvälle paloajalle, palolämpötilalle jne. (katso 12.5). Yllä oleva lauseke sisältää huoneen tilavuuden kaksi kertaa: $A \cdot h$ ja V . Malli mukautetaan parametreilla A ja h ja toisessa tapauksessa vain parametreilla V . Mallityypeistä on tietoja alla.

Malli voidaan mukauttaa eri tyyppien mukaan.

Taulukko 12.4.9:1

Palovirran, paloajan ja palolämpötilan malliparametrit α^2 -palossa.

Laskennassa käytettiin neljää eri mallityyppiä ja seuraavia syöteparametrien yhdistelmiä:

Mallityyppi 1 αV

Mallityyppi 2 $\alpha V u$

Mallityyppi 3 $\alpha A h$

Mallityyppi 4 $\alpha A h u$

Tässä tiivistelmässä soveltaminen rajataan mallityypeihin 1 ja 3.

Parametrilla u on vähäinen vaikutus palovirtaan, eikä aina myöskään tiedetä, millä tasoilla ilmanpoisto tapahtuu. Siksi mallityyppejä 2 ja 4 ei käsitellä.

Malliparametrit esitetään taulukossa 12.4.9:1. Näitä parametreja käytetään luvussa 12.5 esitettyssä lausekkeessa.

Taulukossa olevat eksponentit osoittavat, miten eri syöteparametrit vaikuttavat eri tulostietoihin.

- Palon kasvunopeuden kasvu kasvattaa palovirtaa, lyhentää paloaikaa ja nostaa palolämpötilaa merkityksellömän vähän.
- Lattiapinta-alan kasvu kasvattaa palovirtaa, pidentää paloaikaa ja nostaa palolämpötilaa merkityksellömän vähän.
- Huonekorkeuden kasvu kasvattaa palovirtaa merkittävästi, pidentää paloaikaa ja alentaa palolämpötilaa merkityksellömän vähän.
- Huoneen tilavuuden kasvu kasvattaa palovirtaa, pidentää paloaikaa ja nostaa palolämpötilaa merkityksellömän vähän.

Tulostieto	Malli	Kerroin	Parametrin x eksponentti			
		f	$e\alpha$	eA	eh	eV
q_b	1	0,0137	0,4231	0	0	0,5134
q_b	3	0,0081	0,4231	0,5009	1,0394	0
t_b	1	86,677	-0,3328	0	0	0,3492
t_b	3	92,821	-0,3328	0,3508	0,2799	0
T_b	1	379,29	0,0695	0	0	0,0035
T_b	3	409,33	0,0695	0,0054	-0,0736	0

Sprinklerin laukeamiseen t^2 -palossa liittyvä korjaus

Sprinkleri ei voi laueta, ennen kuin laskennallinen palovirta on saavutettu.

Jos sprinkleri sen sijaan laukeaa sen jälkeen, kun palovirta on ohittanut maksimin, laskelmat palokaasun leviämisestä ilmastointijärjestelmän kautta tulee tehdä samalla tavalla kuin sprinklerittömän rakennuksen tapauksessa.

Raportissaan Jensen oletti, että palovirta rajoittuu arvoon, joka sillä oli sprinklerin lauetaessa. Tässä tapauksessa laskennallinen palovirta voidaan arvioida tarkastelemalla kuvaa 12.4.7:6. Jos sprinkleri laukeaa hetkellä, joka on 75 % maksimiarvon saavuttamisajasta, voidaan todeta, että palovirtaan kohdistuu sama pienentyminen kuin laskentalausekkeessa 12.5.

Ikkunan romahtamiseen t^2 -palossa liittyvä korjaus

Ikkunan romahtaminen voi purkaa palohuoneen paineen ja poistaa palokaasujen leviämiskin. Ikkuna voi romahtaa lämpöjännitysten vuoksi. Samalla palon kasvuvaihe tietysti aktivoituu.

Tehdyistä analyyseistä käy ilmi, että ikkuna tuskin romahtaa ennen laskennallisen palovirran saavuttamista.

12.5 Laskentalauseke t^2 -paloille

Seuraavassa esitetään lauseke palovirran, paloajan ja palolämpötilan laskentaan. Lauseke annetaan usean desimaalin tarkkuudella. Tätä ei saa ylitulkita, sillä lausekkeen arvot ja simuloidut arvot poikkeavat toisistaan vain vähän. Huomaa myös, että simuloituissa arvoissa oletuksena on yksinkertainen kaksiväyhykemalli.

Lauseketta voidaan soveltaa mihin tahansa malleista 1–4. Tässä esitetään lauseke mallityypille 3, jossa käytetään taulukon 12.4.9:1 parametreja.

$$\begin{aligned}q_b &= 0,0081 \cdot \alpha^{0,4231} \cdot A^{0,5009} \cdot h^{1,0394} & (\text{m}^3/\text{s}) \\t_b &= 92,821 \cdot \alpha^{-0,3328} \cdot A^{0,3508} \cdot h^{0,2799} & (\text{s}) \\T_b &= 409,33 \cdot \alpha^{0,0695} \cdot A^{0,0054} \cdot h^{-0,0736} & (\text{K})\end{aligned}$$

Mallityypille 1:

$$\begin{aligned}q_b &= 0,0137 \cdot \alpha^{0,4231} \cdot V^{0,5134} & (\text{m}^3/\text{s}) \\t_b &= 86,677 \cdot \alpha^{-0,3328} \cdot V^{0,3492} & (\text{s}) \\T_b &= 379,29 \cdot \alpha^{0,0695} \cdot V^{0,0035} & (\text{K})\end{aligned}$$

q_b = laskennallinen palovirta
 t_b = laskennallinen paloaika (q_b :stä maksimiin)
 T_b = laskennallinen palolämpötila (kaasukerroksen keskilämpötila)

- α :n yksikkönä on W/s^2 (ei kW/s^2 , kuten tavallisesti)

Palotehoksi lasketaan $Q_b = \alpha \cdot t_b^2$

- Tämä on ylävyöhykkeeseen siirtyvä paloteho (häviöt ympäristöön poissulkien).

12.6 Paine suljetussa, tiiviissä palohuoneessa

Tavallisissa rakennuksissa ei ole täysin tiiviitä palohuoneita. Kaikki palohuoneen vaipat vuotavat enemmän tai vähemmän, mikä voidaan osoittaa painekokeella. Tämä heijastuu myös viranomaismääräyksissä (Boverkets Byggregler BBR), joita käsitellään luvussa 12.7.2.

Voi kuitenkin olla kiinnostavaa selvittää paineen nousu tilanteessa, jossa palohuoneen voidaan olettaa olevan täysin tiivis.

Haettu paine on paineen kasvu aikayksikköä kohti ja voidaan ilmaista seuraavasti:

$$dp/dt = (R/Mc_v) P/V \quad (\text{Pa/s})$$

jossa

R = kaasuvakio 8 314 J/kg K
 M = ilman molekyylipaino 28,97 kg/kmol
 c_v = lämpökapasiteetti, vakiotilavuus 700 J/kg K
 P = teho W
 V = palohuoneen tilavuus m^3

Käyttämällä vakioita lauseke yksinkertaistuu muotoon

$$dp/dt = 0,4 P/V \quad (\text{Pa/s})$$

Oletetaan, että $P = 0,5 \text{ MW}$ ja $V = 250 \text{ m}^3$

Tällöin $dp/dt = 800 \text{ Pa/s}$.

Paine siis kasvaa todella nopeasti ilmastointijärjestelmässä olevan paineen suhteen ja jopa sellaisten paineiden suhteen, joita palohuoneen rakenteet kestävät.

Seuraavassa luvussa käsitellään painetta lähes suljetussa huoneessa. Tällaisessa tapauksessa paineen nousu on hiukan hitaampaa, koska laajenemisvirran osittainen virtaus pois huoneesta alentaa kasvunopeutta hiukan. Siitä huolimatta paineen nousu on verrattain nopeaa, ja palovirran, vuotovirran sekä ilmastointijärjestelmän vaikutuksen välinen tasapainotila saavutetaan yleensä muutamassa minuutissa.

12.7 Paine lähes suljetussa tilassa

12.7.1 Laajenemisvirtaus (palovirta) palohuoneesta

Lähes suljetussa huoneessa, yhden huoneen palo-osastossa, syttyvä palo aiheuttaa lämpölaajenemista ja paineen nousua, jota laajenemisvirtauksen painehäviö eri vuotoaukkojen yli tasapainottaa. Tätä virtausta sanotaan palovirraksi, ja se on kuvattu aikaisemmin tässä luvussa.

Palo itsessään ei kasvata painetta, mutta tehon tai lämpötilan nousu aiheuttaa lämpölaajenemisen palohuoneessa riippumatta siitä, onko huone avoin vai suljettu. Jos aukot ovat suuria (esimerkiksi ovia), laajenemisvirran painehäviö aukon yli on pieni, käytännössä olematon. Jos aukot sen sijaan ovat pieniä, esimerkiksi luonnostaan esiintyviä halkeamia, painehäviö voi olla merkittävä, jopa tuhansia Pascaleita palohuoneen vaipan kestävyys mukaan. Useimmissa tapauksissa huoneessa on muitakin aukkoja, kuten erilaisia ilmastointiaukkoja, jotka osaltaan rajoittavat paineen nousua.

Katso yksinkertaistettu painelaskelma luvussa 12.7.6.

12.7.2 Vuodot ympäröivän vaipan rakojen ja halkeamien kautta

Yleistä

Käytännössä mikään rakenneos ei ole tiivis ilman erillisiä toimenpiteitä. Käsikirjassa on aikaisemmin todettu, että kansainvälistä tiiviyden yksikköä S ei vielä ole otettu käyttöön Ruotsin rakennusvirastossa muuten kuin erikoistapauksissa (palokaasutiiviit ovet).

Palo-osaston erottavat rakenneosat, palotekninen luokka EI, katsotaan yleensä tiiviiksi. Voimassa olevien koestusnormien mukaan ne eivät kuitenkaan ole täysin tiiviitä.

Lisäksi rakenneosat eivät ole homogeenisia vaan sisältävät elementtejä, kuten ovia, ikkunoita ja luokkuja, joiden liitäntä rakenneosaan ei ole täysin tiivis. Myös rakenne-elementtien välissä saattaa olla rakoja.

Lopuksi tulee ottaa huomioon erilaisten asennusläpivientien aiheuttamat epätiiviydet.

Lämpövaippa

Palohuoneessa voidaan yleisesti ottaen olettaa olevan ulkoseinä, lämpövaippa. Joissakin tapauksissa, kuten kulmahuoneissa tai läpikulkuhuoneissa, niitä saattaa olla kaksi tai enemmän.

Jo useita vuosia sitten lämpövaipan tiiviys huomioitiin rakennussäännöksissä ja hyväksyttävälle vuodoille asetettiin vaatimukset energiankulutusnäkökulmasta. Aukon tiiviystaso on helppo laskea tiiviysvaatimusten avulla (katso 12.7.5).

Tässä on huomattava tärkeä ero säännösten BBR 2002:19 ja BBR 2006:12 välillä.

BBR 2002:19:

Määräys on ilmatiiviyttä koskevassa normissa BBR 9:212, jossa vaaditaan, että lämpövaipan keskimääräinen vuoto ± 50 Pa paine-erolla on enintään $0,8 \text{ l/sm}^2$ asunnoissa ja $1,6 \text{ l/sm}^2$ muissa tiloissa. Tässä tulee ottaa huomioon normin BBR 9:2111 mukainen ala A_{om} . Koteloiva rakenneos A_{om} erottaa asuntojen tai muiden tilojen lämmitetyt osat ulkoilmasta, maasta tai osittain lämmitetystä tilasta.

BBR 2006:12:

Rakennuksen lämpövaipan on oltava niin tiivis, että keskimääräinen vuoto $+50$ Pa:n paine-erolla on enintään $0,6 \text{ l/sm}^2$. Tässä tulee käyttää alaa A_{om} (BBR 9:12). Koteloivat rakenneosat A_{om} erottavat asuntojen tai muiden tilojen lämmitetyt osat ulkoilmasta, maasta tai osittain lämmitetystä tilasta.

HUOM!

Lasku $0,8$:sta $0,6 \text{ l/sm}^2$:aan asunnoissa ja vuototaso ($0,6 \text{ l/sm}^2$) koskevat myös muita rakennuksia kuin asuntoja.

Muut seinät

Muiden ympäröivien pintojen kuin lämpövaipan kautta tapahtuvia vuotoja ei määritetä BBR:ssä vaan määritetään tapauskohtaisesti.

Kuten monissa muissakin tapauksissa, palosuoja-laskelmissa on tehtävä kohtuullisia oletuksia jatkolaskelmia varten. Tässä tapauksessa jatkolaskelmilla tarkoitetaan ympäröivän vaipan rakojen ja halkeamien kautta tapahtuvan laajenemisvirran painehäviön määrittämistä.

On kohtuullista olettaa, että muissakin seinissä kuin lämpövaipassa on rakoja.

Jos palohuoneen muut ympäröivät seinät ovat väliseiniä, yleensä levyä, muille seinille oletetaan sama vuototaso kuin lämpövaipalle. Käytännössä oletetaan siis, että kaikissa ympäröivissä seinissä on rakoja ja halkeamia.

Jos muut seinät sen sijaan ovat homogeenisia, esimerkiksi betonia, vain sille seinälle, jossa on ovi palohuoneeseen, oletetaan sama vuototaso kuin lämpövaipalla. Yksinkertaistetusti sanottuna siis lämpövaipalle laskettu vuototaso kaksinkertaistetaan. Joissakin tapauksissa saattaa olla, että vain ovellinen seinä on väliseinä betoniseinän asemesta, mutta se ei muuta oletettua vuototasoa.

Muissa kuin tässä viitatuissa tapauksissa tehdään kohtuulliset oletukset tapauskohtaisesti.

Lattia ja katto

Lattiassa ja katossa ei oleteta olevan rakoja, ellei ole selvää, että rakenteessa on luonnollisesti halkeamia. Tee tässä tapauksessa kohtuulliset oletukset.

Testaus

Joissakin tapauksissa, esimerkiksi jo olemassa olevaa rakennusta koskevista laskelmissa, voi olla syytä määrittää vuodot painetestin avulla.

12.7.3 Vuodot usean huoneen palo-osastossa

Monihuoneisessa palo-osastossa voidaan ajatella toisenlaisia tilanteita.

Oletetaan, että palohuoneen ovi on kiinni ja että palohuoneessa on ilmanottoaite mutta ei ilmanpoistolaitetta. Tällöin siirtoilma-aukko, esimerkiksi oven ylä- tai alapuolella oleva rako, huolehtii poistoilmasta, ja laajentumisvirta lasketaan siirtoilma-aukolle edellä kuvatulla tavalla käyttämällä tiheyttä, joka vastaa siirtoilma-aukon paikkaa palohuoneessa. Palohuoneen vuotojen (rakojen ja halkeamien) oletetaan muuten olevan samat kuin edellä.

Oletetaan sen sijaan, että palohuoneen ovi on auki. Palovirta määritetään palohuoneen ehtojen mukaan, ja vuoto halkeamien kautta voidaan laskea koko palo-osaston vaipalle. Yksi esimerkki tällaisesta tilanteesta on asunto.

12.7.4 Ilmastointilaitte vaipassa

Ympäröivässä vaipassa voi myös olla ”ohjattu vuoto” erilaisten ilmastointilaitteiden, kuten otto-, poisto- tai siirtoilmalaitteiden, kautta – katso lisätietoja jäljempänä.

12.7.5 Tehollisen aukon vuodon tai virtauksen laskenta

Usein voi olla kiinnostavaa tietää, miten suuri laajentumisvirta palohuoneen vaipan yli on lasketulla palohuoneen paineella. Alla esitetään tehollisen alueen laskelmat erilaisille aukoilta palohuoneen vaipassa. Tehollisen aukon sekä paineen laskennassa täytyy tuntea tiheys ja lämpökapasiteetti.

Lämpötila °C	Tiheys kg/m ³	Lämpökapasiteetti J/kg·K
20	1,21	1007
40	1,13	1008
60	1,06	1009
80	1,00	1011
100	0,95	1012
150	0,83	1017
200	0,75	1026
250	0,67	1035
300	0,62	1046
400	0,52	1069
500	0,46	1093
750	0,35	1144
1000	0,28	1193
1500	0,20	1282
2000	0,16	1468
2500	0,13	1199

Normin BBR 9:4 vaatimuksen mukaan **vuoto rakennuksen lämpövaipassa** saa olla enintään 0,6 l/s m², kun paine-ero on +50 Pa. Vaatimus koskee kaikenlaisia rakennuksia.

Vuoto voidaan merkitä

$$q = A_e \cdot (2 p_d / \rho)^{1/n} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

jossa

A_e = tehollinen vuotoala m²

p_d = paine-ero Pa

ρ = tiheys kg/m³

$n = 1$ laminaarisessa virtauksessa

$n = 2$ pyörteisessä virtauksessa

Kun $q=0,6 \text{ l/sm}^2$, $p_d = 50 \text{ Pa}$, $\rho = 1,2$ ja $n = 2$ (pyörteinen virtaus), saadaan

$$A_e = 0,000066 \text{ m}^2 / \text{m}^2$$

Palohuoneen aukot (halkeamat ja raot) määritetään oletettujen seinien määrän mukaan luvussa 12.7.2 kuvatulla tavalla. Aukon voidaan olettaa vastaavan rakoa lattian ja katon välissä, jolloin virtaus raon läpi lasketaan arvoilla $\rho = \rho_g$, $n = 1,5$ ja C (ulosvirtauskerroin) = 0,8.

Ulkoilmalaitteen paine-eron oletetaan olevan 10 Pa, kun virtaus on 20 l/s (valmistajan tieto). Ulosvirtauskerrointa ei tässä tapauksessa oteta huomioon.

$$\text{Virtaus } 0,020 = A_g \cdot (2 \cdot 10 / 1,2)^{0,5}$$

antaa teholliseksi alaksi

$$A_g = q / (2 p_a / \rho)^{0,5} = 0,020 / (2 \cdot 10 / 1,2)^{0,5} = 0,00490 \text{ m}^2$$

Vastaavasti voidaan laskea **poistoilmalaitteen** tehollinen ala, jos tunnetaan virtaus ja paine-ero normaalikäytössä.

Tuloilmalaitteen ja **siirtoilmalaitteen** kohdalla päättely on hiukan erilainen.

Tuloilmalaitteessa virtaussuunta kääntyy palokaasun levitessä. Tällöin oletetaan, että tiedot ovat samat kuin virtauksessa normaalisuuntaan, ja tehollinen ala lasketaan samalla tavalla kuin poistoilmalaitteelle.

Siirtoilmalaitteessa virtaussuunta voi olla normaali tai käänteinen palotilanteessa sen mukaan, miten laitteen on tarkoitus toimia. Tee samat oletukset kuin tuloilmalaitteelle.

Kummassakin tapauksessa ulosvirtauskerroin voidaan jättää huomiotta, sillä (valmistajan) tiedot täytyy dokumentoida testaamalla.

12.7.6 Paineen laskenta

Esimerkki yksinkertaistetusta painelaskelmasta

- Oletetaan, että palohuoneen pinta-ala on 30 m^2 ja korkeus 2,5 m.
- Palohuoneessa on poistoilmajärjestelmä, jonka virtaus on 20 l/s. Poistoilmalaitteen painehäviö on 60 Pa ja ulkoilmalaitteen painehäviö 10 Pa nimellisvirtauksella 20 l/s.
- Oletetaan, että palo noudattelee NFPA Medium -käyrää, jolloin palovirta = 325 l/s, katso taulukko 12.3.4:1.
- Palokaasukerroksen keskilämpötilan maksimipalovirralla oletetaan olevan $250 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Tiheys tässä lämpötilassa on $0,67 \text{ kg/m}^3$.
- Määritä rakojen, ulkoilmalaitteen ja poistoilmalaitteen tehollinen pinta-ala.

Edellisen luvun mukaan saadaan:

- Oletetaan, että rakoja on kahdessa palohuoneen seinässä ja että vuoto on BBR:n mukaisesti $0,6 \text{ l/s, m}^2$ paineen ollessa +50 Pa.
 - Yhden palohuoneen seinän pituudeksi asetetaan $30^{0,5} \text{ m}$.
- $$A_e = 0,000066 \text{ m}^2/\text{m}^2$$

$$\begin{aligned} &\text{Kahdelle palohuoneen seinälle saadaan} \\ &2 \cdot \text{leveys (m)} \cdot \text{korkeus (m)} \cdot 0,000066 = \\ &= 2 \cdot 30^{0,5} \cdot 2,5 \cdot 0,000066 = 0,00181 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{Tuloilmalaitteen tehollinen pinta-ala (20 l/s, 60 Pa)} \\ &A_g = q / (2 p_a / \rho)^{0,5} = 0,020 / (2 \cdot 10 / 1,2)^{0,5} = \\ &= 0,00200 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Ulkoilmalaitteen tehollinen pinta-ala on edellä esitetyn mukaan $0,00490 \text{ m}^2$.

Tehollisten alojen summa on $0,00871 \text{ m}^2$, ja sen katsotaan sijaitsevan ylemmässä vyöhykkeessä (palokaasukerroksessa).

Koko oletettu palovirta työntyy ulos tehollisen pinta-alan kautta. Palopaine voidaan siis laskea seuraavasti:

$$0,325 = 0,00871 \cdot (2 \cdot p_b / 0,67)^{0,5}$$

Tästä saadaan

$$p_b = 466 \text{ Pa, pyöristettynä } 450 \text{ Pa.}$$

Esimerkki (Ondrus)

Huoneessa kehittyy palo, josta syntyy 100 kW:n teho ylempään kaasumassaan.

Huoneessa on 1 m leveä ovi ja 1 cm korkea rako lattian tasolla.

Määritä

- massavirta raon läpi
- ylipaine huoneessa.

Massavirralle pätee

$$\begin{aligned} m &= Q / (c_p \cdot T) \\ Q &= 100 \text{ kW} = 10^5 \text{ W} \\ c_p &= 1000 \text{ J/kg, K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T (\text{ilma}) &= 20 \text{ }^\circ\text{C} = 293 \text{ K} \\ \text{saadaan } m &= 1 \cdot 10^5 / (1000 \cdot 293) = 0,34 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Huoneen ylipaineelle pätee

$$\begin{aligned} \Delta p &= (m / A)^2 \cdot (1 / 2 \rho) \text{ Pa} \\ m &= \text{massavirta kg/s} \\ A &= \text{vuotoalue } \text{m}^2 \\ \rho &= \text{tiheys kg/m}^3 \\ \text{saadaan } \Delta p &= (0,34 / 0,01)^2 \cdot (1/2 \cdot 1,2) = 482 \text{ Pa} \end{aligned}$$

DSLAYV

Vertaa myös laskentaesimerkkiin 15, palohuoneen paineen laskeminen.