

Rakennusalan täyden palvelun tietotalo

Rakennustieto Oy edistää hyvää rakennustapaa ja tuottaa rakentamisesta luotettavaa tietoa. Puolueettoman ja asiakaslähtöisen Rakennustieto Oy:n tuotteet kattavat rakentamisen koko elinkaaren suunnittelusta ylläpitoon. Yhtiön omistaa Rakennustietosäätiö RTS.

Tutustu palveluihimme

> rakennustieto.fi/rk/palvelut

Rakentajain kalenterin artikkelit

Tämä artikkeli on julkaistu alun perin Rakentajain kalenterissa, jota ovat julkaisseet Rakennustietosäätiö RTS sr ja Rakennusmestarit ja -insinöörit AMK RKL ry.

Julkaisu oli rakennusalan ammattilaisten ja opiskelijoiden käsikirja, joka yhdisteli teoriaa ja käytäntöä sekä kannusti hyvään rakentamiseen. Artikkelin vasemmassa reunassa olevasta vesileimasta näkee ko. Rakentajain kalenterin vuosikerran.

> [Artikkeliarkisto, kokoelma vuosien 1997–2018 Rakentajain kalenterissa julkaistuista artikkeleista](#)

Rakenteellisen palontorjunnan keinot ja menetelmät

Jyri Outinen, TkL

Erityisasiantuntija, Teräsrakenneyhdistys ry

<http://www.terasrakenneyhdistys.fi>

1 Johdanto

Tässä artikkelissa esitellään rakenteellisen palontorjunnan keinoja ja menetelmiä, joita on kertynyt viimeisten 25 vuoden aikana eri Eurooppalaisissa ja kotimaisissa projekteissa. Artikkelin on tarkoitettu selkiyttämään todellisiin olosuhteisiin perustuvan paloturvallisuusajattelun periaatteet ja sen tuomat hyödyt sekä helpottamaan menetelmän käyttöönottoa.

1960-luvulla tapahtuneet lukuisat dramaattiset tulipalot, kuten suuri ”Innovation”-myymälä Brysselissä, joka vaati yli 300 kuolonuhria ja tulipalo discossa ”Le cinc Sept” Ranskassa, johtivat suureen määrään uusia määräyksiä kaikkialla Euroopassa.

Nykyisissä määräyksissä määritellään mm. seuraavia asioita:

- poistumistiet
- palon leviäminen: sisältäen ”palonkestävyys” ja ”palokäyttäytyminen”
- rakenteen palonkestävyys: määritetään palonkestoaikaluokkina R30, 60, 90 tai 120
- savun ja lämmönpoisto
- aktiiviset palontorjuntavälineet, kuten käsisammuttimet, savunilmaisimet, sprinklerit
- palokunnan vasteaika ts. aika hälytyksen vastaanottamisesta sammutustyön aloittamiseen.

Vaikka paloturvallisuuden yleiset määritelmät ja käsitykset ovat samanlaisia Euroopassa, ovat määräykset kuitenkin erilaisia. Tämä on analysoitu Eurooppalaisessa projektissa NFSC1 [11] ja on päivitetty uudemmassa ECSC projektissa ”Risk Based Fire Requirements” [18]. Esimerkiksi yksikerroksisen rakennuksen palonkestovaatimus on R120 Espanjassa, mutta Sveitsissä sille ei aseteta vaatimuksia [18]. Normaalikerroksuuden toimistorakennuksen palonkestovaatimus on Alankomaissa R60, mutta Ranskassa se on R120 [11]. Vaatimuksiin vaikuttaa rakennuksen korkeus, käyttötarkoitus ja henkilö määrä.

Palonkestovaatimusten pitäisi perustua parametreihin, jotka vaikuttavat palonkehitykseen.

Niitä ovat

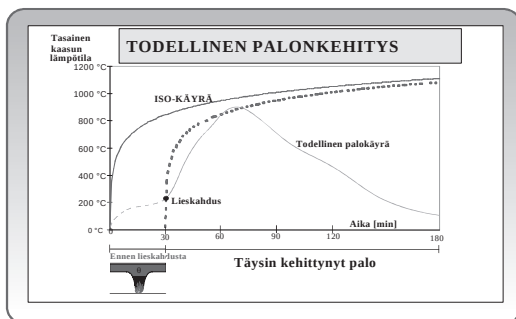
- palo (palon esiintymistodennäköisyys, palon leviäminen, palon kesto, palokuorma – määrä ja jakauma – ja paloteho)
- ilmanvaihto-olosuhteet
- palo-osasto (tyyppi, koko, geometria)
- rakennetyyppi
- poistumismahdollisuudet
- pelastushenkilöstön turvallisuus
- naapurirakennusten syttymisriski
- aktiiviset palontorjuntalaitteistot.

Nykyiset vaatimukset eivät ota riittävästi kantaa sprinklereiden vaikutukseen. Taulukko 1.1 osoittaa, että lukuun ottamatta muutamaa tapaus, vaatimukset ovat miltei samat riippumatta siitä onko kohde sprinklattu vai ei. Näiden eri tekijöiden systemaattiseen tarkasteluun perustettiin Eurooppalainen projekti ”Natural Fire Safety Concept” vuonna 1994 [11, 18]. Tavoitteena oli kehittää todenmukaisempi ja luotettavampi lähestymistapa rakenteellisen paloturvallisuuden analysointiin, jossa otetaan huomioon aktiiviset palontorjuntalaitteistot ja todelliset palon ominaisuudet. Luonnollinen palonkehitys on mahdollista määrittää rakennuksen eri osastoille erikseen. Menetelmä perustuu tilastollisiin, todennäköisyyspohjaisiin ja deterministisiin lähestymistapoihin ja analyysiin. Tämä menetelmä soveltuu kaikille rakennusmateriaaleille ja rakennuksille.

Kuvasta 1.1 huomataan kuinka vaikea on ymmärtää rakennuksen eri osien käyttäytymistä todellisessa palossa standardipalokäyrän perusteella. Todelliseen paloon vaikuttaa ominaisuuksia, joita ei ole otettu standardipalokäyrässä huomioon.

Palon eri vaiheet:

- Kytemisvaihe: syttyminen ja kytevä palo alhaisissa lämpötiloissa, jonka kesto on vaikea arvioida. Tätä vaihetta ei ole esitetty kuvassa 1.2.
- Kasvuvaihe, jota kutsutaan lieskahdusta edeltäväksi vaiheeksi (paikallinen palo): tämän vaiheen kesto riippuu pääosin palo-osaston ominaisuuksista. Palo pysyy paikallisena ennen mahdollista lieskahdusta.



Kuva 1.1. Luonnollisen palon ja standardipalon aika-lämpötiläkäyrät.

- Lieskahdus: koko tilan yleispalovaihe, joka on yleensä melko lyhyt.
- Lieskahduksen jälkeinen vaihe: tämä vaihe riippuu lieskahtaneen palon ominaisuuksista, jonka kesto riippuu palokuormasta ja ilmanvaihdosta.
- Hiipumismisvaihe: palo alkaa hiipua kunnes kaikki syttyvä materiaali on palanut.

2 Metodiikka

Palon kehittymisen määrittäminen palo-osastossa vaatii tietämystä suuresta määrästä siihen vaikuttavia tekijöitä. Osa tekijöistä määräytyy rakennustyypin ominaisuuksien perusteella. Tärkein tekijä, palokuorma, on kuitenkin rakennuksessa tapahtuvasta toiminnasta riippuva ominaisuus, joka vaihtelee rakennuksen käyttöajan aikana. Palokuorma voidaan määrittää tilastollisena jakaumana. Myös normaalilämpötilamitoituksessa käytettävät kuormat, esimerkiksi omapaino, hyötykuorma ja tuulikuorma on määritetty tilastollisen jakauman perusteella.

Edelläkerrotusta johtuen päätettiin rakennusten paloturvallisuus määritellä perustuen tilastollisiin todennäköisyyksiin. Yleisessä todellisiin olosuhteisiin perustuvassa paloturvallisuusajattelussa tavoitteena ei ole muuttaa turvallisuuksitasoa, joka on asetettu paloturvallisuusmääräyksissä, vaan määrittää kohdekohtaisesti todennukaisempia arvoja. Aktiivisen ja passiivisen palontorjunnan sopiva yhdistelmä käytettävien kohteissa saavuttaa hyväksyttävä turvallisuuksitaso. Yleinen menetelmä perustuu rakennesuunnitteluun normaalilämpötilassa, jossa määritetään palokuormalle mitoitusarvo ottaen huomioon palon esiintymistodennäköisyys ja aktiivisen palontorjunnan laitteistot. Rakenteiden käyttäytymistä palossa arvioidaan laskentamalleilla, joissa käytetään palokuorman

laskenta-arvoa. Tässä raportissa annetaan ohjeita rakenteiden palokäyttäytymisen arvioimiseen.

Tavoitteet

Suunnittelun tavoitteena on saavuttaa hyväksyttävä turvallisuuksitaso. Turvallisuuksitaso voidaan määrittää vertaamalla tutkittavaa riskiä muihin esiintyviin riskeihin, kuten rakenteen sortuman riskiin. Todennäköisyys rakenteen sortumalle normaaliolosuhteissa on $7,23 \cdot 10^{-5}$ [10] rakennuksen käyttöajan aikana.

Tavoite on: P_f (vikaantumisen todennäköisyys) $\leq P_t$ (tilastollinen todennäköisyys). Kuten myös Eurocode -järjestelmässä määritellään, tulipalo on onnettomuustapahtuma. Palon esiintymistodennäköisyyttä selvitetiin laajassa tilastollisessa tutkimuksessa. Syntyminen on riippuvainen rakennuksen käytöstä.

Toisessa tutkimuksessa havaittiin, että eri Euroopan maiden tilastot korreloivat hyvin toistensa kanssa [10]. Palon syttyä on sortuman mahdollisuus yleensä mahdollista vain vakavan palon tapauksessa. On välttämätöntä määritellä todennäköisyys tällaiselle tapaukselle. Aktiivisella palontorjunnalla, asukkailla ja palokunnalla on suuri merkitys; monissa tapauksissa palo sammutetaan nopeasti eikä se pääse kehittymään. Aktiivisten palontorjuntalaitteiden ja palokunnan toiminnan vaikutuksia on arvioitu määrittäessä tilastollisesti vakavan palon todennäköisyyttä. Aktiivisen ja passiivisen palontorjunnan keinot, rakennuksen käyttö ja palokunnan toiminta on tässä menetelmässä otettu huomioon, kun on arvioitu suunnittelussa käytettävää palokuorman arvoa todennäköisyyksiin perusteella. Menetelmä on esitelty tarkemmin luvussa Todennäköisyyksiin perustuva lähestymistapa.

Palonkehityksen laskentamenetelmä

Palonkehityksen laskentaan on eritasoisia menetelmiä:

- Yksinkertaiset mallit: pääosin parametriset palot, joita voidaan käyttää esisuunnitteluvaiheessa
- Vyöhykemallit: nämä mallit ottavat huomioon kaikki tärkeimmät paloon vaikuttavat tekijät
- Kenttämallit: ainoa keino laskea monimutkaisen geometrian omaavat kohteet. [19].

Ensimmäisessä vaiheessa tutkimusta analysoidiin yksi- ja kaksivyöhykemalleja. Yksivyöhykemallissa oletetaan, että palolämpötila on tasainen koko tilassa. Kaksivyöhykemallissa oletuksena on, että paikallinen palo kehittää tilaan kaksi lämpötilavyöhykettä. Palonkehityksen pääparametri on lämmönvapautumisnopeus. Se on osaston koon ja käytön sekä ajan funktio. Kuten ensimmäisessä luvussa kuvattiin, kytemisvaihetta lukuunottamatta, palo on aluksi paikallinen palo. Tämän vaiheen alkua kuvataan palon kasvulla, joka kerrotaan t^2 -palo-oletuksella. Tämä tarkoittaa, että lämmönvapautumisnopeus noudattaa parabolista funktiota. Rakennukset on jaettu 4 ryhmään palonleviämisnopeuden mukaan: hidas, keskinopeuksinen, nopea ja ultranopea. Lämmönvapautumisnopeus saavuttaa suurimman arvonsa kun polttoaineen määrän tai ilmanvaihdon rajoittama palo saavuttaa pysyvyytensä. Yksi arvioitava asia on, miten lämmönvapautumisnopeus kehittyy ja lieskah-taako palo vai jääkö palo paikalliseksi.

Vyöhykemalleja on maailmassa lukuisia, mutta näiden mallien taustatiedot eivät useinkaan ole saatavilla. Tästä johtuen päätettiin tässä tutkimuksessa kehittää yksivyöhykemalli Ozone. Tämä malli verifioitiin vertaamalla tuloksia toiseen olemassaolevaan ohjelmaan (NAT [32]), ja yli sataan koetulokseen, jotka kerättiin tietokantaan.

Kun tila ei lieskahda, palo säilyy paikallisena. Tässä tilanteessa kaksivyöhykemallia käytetään arvioimaan kaasukerrosten yleistä vaikutusta. Paikallista vaikutusta liekin lähellä on tutkittu kokeellisin menetelmin aiemmassa tutkimuksessa: 'natural fire in large compartments' [8]. Hasemi [17] teki kokeellisia tutkimuksia määrittääkseen liekin paikalliset vaikutukset, joiden perusteella kehitettiin yksinkertaistettu malli. Molempien mallien yhdistetty käyttö mahdollistaa lämpötilakentän määrittämisen liekin lähellä ja etäämpänä siitä.

Rakenteiden käyttäytyminen palossa

Lämmön siirtyminen rakenteisiin pitää laskea niihin kohdistuvien lämpörasitusten perusteella. Tämä voidaan tehdä eritasoisin menetelmin. Rakenteellista käyttäytymistä voidaan myös arvioida eritasoisin menetelmin sen lämpötilajakauman ja palotilanteessa vaikuttavien kuormien perusteella.

Yksinkertaisessa mallissa laskenta perustuu ns. kriittiseen lämpötilaan. Jos rakenteen lämpötila pysyy kriittistä lämpötilaa alempana, rakenne kestää siihen kohdistuvat rasitukset ja jos se kohoaa sen yli, rakenne sortuu. Tavoite saavutetaan, jos kriittisen lämpötilan saavuttamiseen kuluva aika on pidempi kuin vaadittu palonkestoaika.

Kehittyneempiä malleja, kuten elementtime-netelmään perustuvia malleja voidaan myös käyttää. Tuloksena saadaan yleensä lasketut rakenteen muodonmuutokset koko palonkeston aikana. Joissain tapauksissa toimivuuskriteerit voidaan antaa muodonmuutosten perusteella. Tietämys rakenteen käyttäytymisestä palossa mahdollistaa joissain tapauksissa paloturvallisuuskriteerien asettamisen rajoitettujen muodonmuutosten ja rakenteen vaurioitumisen perusteella. Toimivuuskriteerien asettaminen riippuu sortuman seurauksista ja rakennuksen käytöstä. Joillekin korkean tason monikerroksisille rakennuksille tämä voi tarkoittaa, että palon aikana ei saa tapahtua mitään rakenteellisia vaurioita. Näitä malleja kuvataan tarkemmin jäljempänä

Tarvittavat tiedot

Jotta tätä menetelmää voidaan käyttää, on rakennuksen ominaisuudet tiedettävä. Menetelmää käytetään osastokohtaisesti. Osasto pitää määritellä geometrialtaan ja myös rajoittavien pintojen termsiltä ominaisuuksiltaan sekä aukkojen osalta, jotka vaikuttavat ilmapirtauksiin palon aikana. Näitä seikkoja käsitellään seuraavassa luvussa.

3 Palo-osaston ominaisuudet

Johdanto

Todellisiin palo-olosuhteisiin perustuvassa lähestymistavassa paloturvallisuussuunnittelu perustuu määritettyihin lämpörasituksiin. Toisin kuin perinteisessä suunnittelussa, tekijät kuten palokuorma, lämmönvapautumisnopeus ja ilmanvirtauksen määrä ovat tärkeässä asemassa oletettuun palonkehitykseen perustuvassa suunnittelussa. Suurimassa osassa rakennuksia palloskenaarioiden määrä on ääretön, jolloin mää-

rää pitää rajata. Ainoastaan todenmukaiset paloskenaariot tutkitaan. Valittujen paloskenaarioiden perusteella voidaan lämpörasitukset laskea usealla eri menetelmällä.

Osastoa rajaavat rakennusosat

Oletettuun palonkehitykseen perustuvassa lähestymistavassa palonkehitys kuvataan palosastoittain. Oletuksena on, että palo ei leviä osastosta toiseen, mikä riippuu osastoa rajaavien rakennusosien (lattia, seinät, ovet ym.) käyttäytymisestä palossa. On välttämätöntä ymmärtää näiden osien käyttäytyminen palossa, jotta niiden toimivuutta palomuurina voidaan arvioida.

Käytettävissä ovat seuraavat mahdollisuudet:

- Kokeellinen testaus suunnittelun tueksi; rakennos voidaan testata käyttäen suunnittelussa käytettyä palonkehitystä. Tämä voi johtaa suureen määrään kokeita.
- Asiantuntija-arvio; tällä menettelytavalla voidaan käyttää hyväksi olemassa olevia standardipalonestävyyskokeiden koetuloksia yhdistettynä valittujen paloskenaarioiden palomallinnukseen. Menettelytapa ei sovellu monimutkaisiin rakenteisiin.
- Suora palonestävyysvaatimusten käyttö; kansalliset ohjeet määrittelevät palo-osastojen rakennosien palonestävyyden niiden käyttötavan ja geometrian perusteella. Oletuksena on, että palo ei leviä osastosta toiseen.

Kahta ensimmäistä mahdollisuutta voidaan käyttää rajalliseen määrään osastoivia rakenteita ja niiden käyttö voi olla kallista. Vielä usein valitaan kolmas vaihtoehto, koska riittävää tietoa todellisesta palonkehityksestä ei ole.

Seinä: termiset ominaisuudet

Lämmön siirtyminen osastosta vaikuttaa olennaisesti lämpötilan kehitykseen. Lämpö siirtyy osastosta rakenteisiin ja niiden läpi kuljettumalla ja säteilemällä. Seinien termiset ominaisuudet pitää tuntea. Kolme pääparametria materiaalin termisten ominaisuuksien määrittämiseen ovat:

- ominaislämpö c_p
- tiheys ρ
- lämmönjohtavuus λ .

Lämmönjohtavuus ja ominaislämpö ovat riippuvaisia lämpötilasta.

Yksinkertaisissa malleissa käytetään suuretta b , vaipan lämmönabsorptiokykyä, joka määritellään seuraavasti:

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p} \quad (3.1)$$

Kun vaipan pinnassa on erilaisia materiaalikeroja, suureen b arvo valitaan seuraavasti:

- jos $b_1 < b_2 = b_1$
- jos $b_1 > b_2$, palolle altistetun materiaalin rajapaksuus lasketaan kaavasta:

$$S_{1, \text{lim}} = \sqrt{\frac{t_d \lambda_1}{c_1 \rho_1}} \quad (3.2)$$

josta t_d on korkeinta lämpötilaa vastaava ajanhetki

Jolloin b -tekijä lasketaan:

- jos $s_1 > S_{1, \text{lim}}$, $b = b_1$

$$- \text{jos } S_1 < S_{1, \text{lim}} \quad b = \frac{S_1}{S_{1, \text{lim}}} b_1 + \left(1 - \frac{S_1}{S_{1, \text{lim}}}\right) b_2$$

Taulukossa 3.1 on esitetty joidenkin materiaalien termisiä ominaisuuksia eri lämpötiloissa.

Aukkojen ominaisuudet

Osaston aukkoja ovat ikkunat, ovet ja ilmastointiventtiilit. Palonkehitys riippuu osaston aukkojen määrästä. Yksinkertaisissa malleissa aukkojen O yhdelle seinässä olevalle pystyaukolle lasketaan seuraavasti:

$$O = A_w \sqrt{H} \quad (3.3)$$

Kun seinissä on useita pystyaukkoja, käytetään tilan kokonaisalaa A_w ja seinissä olevien aukkojen painotettua keskiarvoa H , jotka määritellään seuraavasti:

$$A_w = \sum A_{wi} \quad (3.4)$$

$$H = \left[\frac{\sum A_{wi} \sqrt{H_i}}{\sum A_{wi}} \right]^2 \quad (3.5)$$

jossa A_w on kaikissa seinissä olevien pystyaukkojen kokonaispinta-ala ja H on aukon korkeus. Indeksillä i viitataan yksittäiseen aukkoon.

Koneellinen ilmanvaihto

Porraskäytävien suojauksessa voidaan käyttää myös paineistamista. Savun ja lämmönpoistojärjestelmässä käytetään usein koneellista ilmanvaihtolaitteistoa.

Taulukko 3.1 Materiaalien termisiä ominaisuuksia.

Materiaali	Lämpötila (°C)	λ (W/m/K)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg·K)
Normaalibetoni	20	2	2300	900
	200	1,63	2300	1022
	500	1,21	2300	1164
	1000	0,83	2300	1289
Kevytbetoni	20	1	1500	840
	200	0,875	1500	840
	500	0,6875	1500	840
	1000	0,5	1500	840
Teräs	20	54	7850	425
	200	47	7850	530
	500	37	7850	667
	1000	27	7850	650
Kipsilevyeristeet	20	0,035	128	800
	200	0,06	128	900
	500	0,12	128	1050
	1000	0,27	128	1100
Tiivistyssementti	20	0,0483	200	751
	250	0,0681	200	954
	500	0,1128	200	1052
	800	0,2016	200	1059
Kalsiumsilikaattilevy	20	0,0685	450	748
	250	0,0786	450	956
	450	0,0951	450	1060
	1050	0,157	450	1440
Puu	20	0,1	450	1113
	250	0,1	450	1125
	450	0,1	450	1135
	1050	0,1	450	1164
Tiili	20	1,04	2000	1113
	200	1,04	2000	1125
	500	1,18	2000	1135
	1000	1,41	2000	1164
Lasi	20	0,78	2700	840

4 Palon ominaisuudet

Tämän kappaleen tavoitteena on antaa suunnittelijalle riittävät tiedot paloon liittyen. Ensimmäinen asia, joka pitää selvittää, on palossa rakenteisiin kohdistuva energia. Yksi tapa on selvittää se kokeellisesti, mutta se on epätaloudellista ja antaisi informaatiota vain yhdestä rakennuksen mahdollisista paloskenaarioista. Erilaisille palotapauksille voidaan määritellä ominaisuuksia käyttämällä hyväksi olemassa olevaa tietoa palokokeista, laskentamalleista ja palodynamiikasta.

Palokuorma

Ensimmäinen tehtävä on selvittää suunnittelusta käytettävä palokuorma. On erittäin harvinaista, että palokuorma tunnetaan tarkoin. Se pitää yleensä selvittää tilastollisesti.

Deterministinen lähestymistapa

Palokuorma on vapautuvan lämpöenergian summa kaiken palavan materiaalin palaessa kyseisessä tilassa. Osa energiasta kuluu osaston lämmittämiseen (rakenteet ja sisätilan kaasut). Loput energiasta poistuu aukkojen kautta. Palokuorma koostuu tilan sisällä olevasta palavasta materiaalista, kuten mm. pintamateriaaleista ja kalusteista. Kun palokuorma Q jaetaan lattiapinta-alalla, saadaan palokuorman tiheys q_f .

Palokuorman tiheyden ominaisarvo lasketaan Eurocode 1:ssä seuraavalla kaavalla (4.1):

$$q_f = \frac{1}{A_f} \sum_i (\psi_i \cdot m_i \cdot H_{ui} \cdot M_i) \quad (4.1)$$

jossa

M_i palavan materiaalin i määrä [kg]

H_{ui} materiaalin i nettolämpöarvo [MJ/kg] (ks.

Taulukko 4.1)

mi tekijä joka kuvaa materiaalin I palokäyttäytymistä

Ψ_i suojattujen palokuormien määrittämiseen käytettävä kerroin i

A_f palotilan lattiapinta-ala [m²].

$H_{ui} \cdot M_i$ esittää materiaalin i sisältämän kokonaisenergian määrän ja vapautuneen energian määrän olettaen, että materiaali palaa täydellisesti. Tekijän m arvo on välillä 0–1 ja se esittää palamisen tehoa siten, että arvolla $m = 1$, materiaali palaa täydellisesti ja arvolla $m = 0$, materiaali ei pala ollenkaan. Yleisesti materiaaleille esitetään käytettäväksi arvoa $m = 0.8$. Puulle esitetään H_u arvoksi 17,5 MJ/kg, jolloin mH_u olisi 14 MJ/kg.

Tilastollinen lähestymistapa

Palokuorman tiheys voidaan arvioida laskemalla yhteen kaikki rakennuksen palokuormat. Tätä kutsutaan deterministiseksi lähestymistavaksi. Joillekin rakennustypeille, kuten kouluille ja toimistoille on olemassa tietoa palokuorman määrästä. Tämä tilastollinen lähestymistapa soveltuu vain rakennustypeille, joissa voidaan olettaa olevan samaa suuruusluokkaa oleva palokuorman määrä. Näissä tapauksissa palokuorman tiheys voidaan antaa tilastollisena jakaumana.

Seuraavassa taulukossa annetaan näitä arvoja. Arvot perustuvat Gumbel-jakautumaan. Tiedot on kerätty kansainvälisistä tilastodokumenteista [2, 21, 22].

Palotyypit

Toinen vastausta vaativa kysymys on: mikä on kokonaispalokuorma, joka palaa palossa ja miten se vaikuttaa aika-lämpötilakäyrään paloskenaariossa.

Palo ei ala koskaan yhtäaikaaisesti koko osastossa (tuhopoltot ja räjähdykset eivät kuulu tähän tutkimukseen). Ne alkavat aina paikallisena palona, joka sitten kehittyy suuremmaksi paloksi. Pääasialliset erot paikallisen ja täysin kehittyneen palon välillä on esitetty taulukossa 4.3.

Tilanteissa, joissa koko osasto osallistuu paloon, oletetaan lämpötilan olevan tasainen koko tilassa. Täysin kehittyneessä palossa koko palokuorma palaa ja osasto on täynnä savua, palamistuotteita ja ilmaa sekoittuneena siten, että voidaan olettaa kaasun lämpötilan olevan tasainen koko osastossa.

Tässä tutkimuksessa on kehitetty menetelmä, jossa rakenteiden käyttäytymisen arvioimisessa voidaan käyttää määritettyä täysin kehittyneen palon tai paikallisen palon aika-lämpötilakäyrää. Sitä käsitellään jäljempänä luvussa Palonkehityksen laskenta.

Taulukko 4.1 Palavien materiaalien nettolämpöarvoja H_u (MJ/kg) palokuormien laskentaan.

Kiinteitä aineita

Puu	17,5
Muita selluloosaperustaisia materiaaleja	20
• Vaatteet	
• Korkki	
• Puuvilla	
• Paperi, pahvi	
• Silkki	
• Olki	
• Villa	
Hiili	30
• Antrasiitti	
• Puuhiili	
• Kivhiili	

Kemikaalit

• Parafiinisarja	
• Metaani	
• Etaani	
• Propani	
• Butaani	
Olefiinisarja	45
• Eteeni	
• Propreeni	
• Buteeni	
Aromaattinen sarja	40
• Bentseeni	
• Tolueeni	
Alkoholit	30
• Metanoli	
• Etanoli eli etyylialkoholi	
Polttoaineet	45
• Bensiini	
• Dieselöljy	
Puhtaat hiilivetymuovit	40
• Polyeteeni	
• Polystyreeni	
• Polypropeeni	
Muut tuotteet	
ABS-muovi	35
Polyesteri (muovi)	30
Polyisosyanaatti ja polyuretaani (muoveja)	25
Polyvinylkloridi eli PVC (muovi)	20
Bitumi, asfaltti	40
Nahka	20
Linoleumi	20
Kuminen ajoneuvon rengas	30

HUOM. Tässä taulukossa esitetyt arvot eivät sovellu polttoaineiden energiasisällön laskentaan.

Taulukko 4.2 Palokuorman tiheydet [MJ/m²] rakennuksen käyttötavan mukaan.

	Keskihajonta	Keskiarvo	80 % fraktiili	90 % fraktiili	95 %fraktiili
Asuinrakennus	234	780	948	1085	1217
Sairaala	69	230	280	320	359
Hotelli (huone)	93	310	377	431	484
Kirjasto	450	1500	1824	2087	2340
Toimisto (standardi)	126	420	511	584	655
Koulu	85,5	285	347	397	445
Ostoskeskus	180	600	730	835	936
Teatteri (elokuva)	90	300	365	417	468
Liikenneterminaali (yleinen tila)	30	100	122	139	156

Taulukko 4.3 Paikallisen palon ja täysin kehittyneen palon eroja.

	Palokuorma	Kaasun lämpötila
Paikallinen palo	Vain osa osastosta on tulossa	Kaksi vyöhykettä (kaksi lämpötila-aikakäyrää)
Täysin kehittynyt palo	Palokuorma on jakautunut tasaisesti koko osaston alueelle	Yksi vyöhyke (yksi lämpötila-aikakäyrä)

Mitoituspalo

Kun palokuorma on määritetty, täytyy tietää myös millä nopeudella palokuorma oletetusti palaa. Näiden tietojen avulla voidaan arvioida lämmönvapautumisnopeutta.

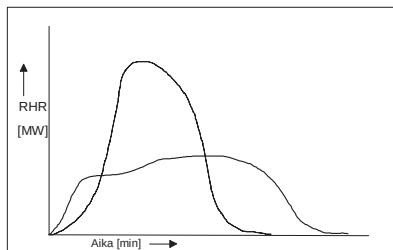
Polttoaineen määrän ja ilmanvaihdon rajoittamat palot

Palokuorma määrittelee käytettävissä olevan energian määrän, mutta kaasun lämpötila palossa riippuu lämmönvapautumisnopeudesta. Saman palokuorman palaminen nopeasti tai hi-

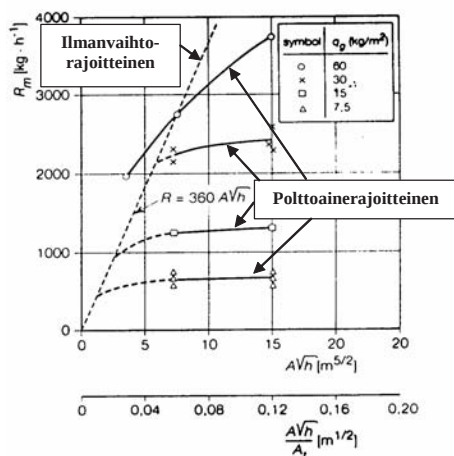
taasti voi johtaa täysin erilaisiin lämpötilakäyriin.

Lämmönvapautumisnopeus vaikuttaa kaasun lämpötilan nousuun ja kaasun ja savun leviämiseen. Tyypillinen palo alkaa pienestä ja käy läpi kasvuvaiheen. Palon kehittyminen riippuu siitä, onko palon kasvuvaiheen aikana riittävästi happea. Jos hapen määrä ei rajoita paloa, on kyse polttoainerajoitteisesta palosta. Jos taas osaston koko tai aukkojen määrä on pieni, jolloin osastoon ei virtaa riittävästi ilmaa, on kyseessä ilmanvirtauksen rajoittama palo. Sekä polttoaineen määrän että ilmanvirtauksen rajoittamat palot voivat lieskahtaa.

Lieskahdus merkitsee sitä, että paikallinen palo saavuttaa tilan, jossa kaikki osastossa oleva palava materiaali syttyy. Kuvassa 4.2 esitetään palamisnopeus ilmanvaihtotekijän $A_w \sqrt{h}$ suhteen, jossa A_w on aukon pinta-ala ja h aukon korkeus. Kuvassa on käyrät eri palokuorman tiheyksille. Palo kehittyy aluksi ilmanvaihtorajoitteisena, kunnes saavuttaa polttoainerajoitteisen palon raja-arvon.



Kuva 4.1. Kaksi lämmönvapautumisnopeuden kuvaajaa, joissa on sama palokuorman määrä. Kuvaajien rajaamat pinta-alat ovat samat.



Kuva 4.2. Palamisnopeus eri palokuorman tiheyksille.

Lämmönvapautumisnopeuden suunnittelu-arvo

Lämmönvapautumisnopeuden kasvu (ks. Kuva 4.3) lasketaan kaavasta:

$$RHR = (t/t_{\alpha})^2 \quad (4.2)$$

jossa

RHR = lämmönvapautumisnopeus palon kasvuvaiheen aikana (MW)

t = aika (s)

t_α = aikavakio, joka saadaan kuvasta 4.4 (s)

Kasvuvaiheen jälkeen lämmönvapautumisnopeuden käyrä saavuttaa vakioarvon riippuen siitä, onko kyseessä polttoaineen rajoittama palo vai ilmanvaihdon ohjaama palo.

Lähteissä [1,2] ja [7] tämän vaiheen on oletettu olevan lineaarinen ja jäähtymisvaiheen alkamisajan ja keston laskemiseksi on annettu kaa-

vat. Koetulosten mukaan jäähtymisvaiheen voidaan arvioida alkavan kun noin 70 % palokuormasta on kulunut.

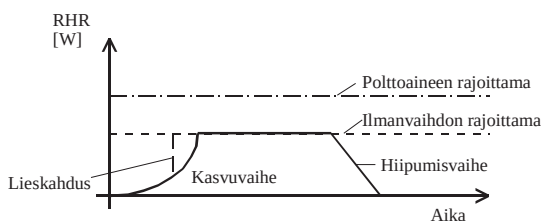
Koetulosten käyttö

Lämmönvapautumisnopeuden käyrä voidaan määrittää myös kokeellisesti. Lämmönvapautumisnopeuden mittaustekniikka (oxygen depletion calorimetry) on kehittynyt riittävän tarkaksi jo vuosia sitten. Hapenkulutuksen periaate on, että pienellä epävarmuudella minkä tahansa materiaalin palossa vapautuvan lämmön määrä on verrannollinen palossa käytettyyn hapen massa- [6]. Tätä tekniikkaa on käytetty ja tuloksista on kerätty tietokanta. Kirjallisuudesta löytyy eri lähteitä lämmönvapautumisnopeuden (RHR) arvoille. [3,4,5,6].

Hazardin [5] kaksivaiheisella mallilla on tietokanta mm. eri tavaroiden lämmönvapautumisnopeudesta. Mallin tietokannan tavarat ovat enimmäkseen asunnoissa olevia ja tämä rajaa mallin käyttöaluetta. Toisaalta tämä informaatiolähde on erittäin hyvä sen rajallisella käyttöalueella. Argos [4] on toinen tietokanta, joka löydettiin palosimulointiohjelman tietokantaa kerättyä. Argosissa on annettu yhtälöitä kiinteiden ja sulavien aineiden, nesteiden ja kytevien materiaalien palamiselle. Nämä yhtälöt määrittävät lämmönvapautumisnopeuden palon leviämisen funktiona pysty- ja vaakasuunnassa. Argos tietokannassa on annettu numeerisia arvoja eri materiaaleille ja esineille.

Yksi koetulosten lähde on the "Initial Fires" dokumentti, joka on tehty Lundin Yliopistossa [3]. Sillä on sama formaatti kuin Hazard tietokannalla, mutta se sisältää enemmän tuloksia. Siitä löytyy kodin tavaroiden lisäksi tietoa mm. erilaisista ajoneuvoista.

CTICM Ranskassa on tehnyt polttokokeita uusille autoille (valmistettu 1996) [9], hotelli- huoneille ja huonekaluille ja mitannut näistä lämmönvapautumisnopeuksia. Saadut koetulokset ovat erittäin mielenkiintoisia, koska monet muut kirjallisuudesta löytyvät polttokokeet on tehty käyttäen puuritiloita palokuormana.



Kuva 4.3. Lämmönvapautumisnopeus (RHR) ajan suhteen. Kolme vaihetta: kasvuvaihe, tasainen täyden palon vaihe ja laskuvaihe.

5 Todennäköisyyksiin perustuva lähestymistapa

Todennäköisyys, että palo alkaa uima-altaassa on selvästi matalampi kuin että palo alkaa esimerkiksi maalaamossa. Todennäköisyys sille leviääkö palo täysin kehittyneeksi paloksi riippuu osaston koosta, aktiivisista palontorjunnan välineistä, kuten sprinklereistä, automaattisista palonilmaisimista, automaattisesta hälytyksestä palokunnalle ja palokunnan vasteajasta.

Eri ECSC tutkimusprojektit [11,18] ovat mahdollistaneet tilastoinnin ja todennäköisyyksien määrittämisen seuraavissa tapauksissa:

- palo syttyy
- asukkaat epäonnistuvat palon sammutuksessa
- automaattiset aktiiviset laitteet (sprinklerit ym.) epäonnistuvat sammutuksessa
- palokunta epäonnistuu sammutuksessa.

Todennäköisyys palokunnan onnistuneelle väliintulolle riippuu pääasiallisesti palon havaitsemiseen kuluvasta ajasta (automaattinen savu- tai lämpötoiminen palonilmaisin) ja ajasta joka kuluu palopaikalle saapumiseen (hälytyksen automaattinen tiedonsiirto palokunnalle ja etäisyys rakennuksesta). Näistä seikoista löytyy tietoa kirjallisuudesta mm. Suomesta (VTT) ja Ruotsista (Lundin yliopisto).

Em. todennäköisyyksistä on mahdollista päätellä $\gamma_{q,f}$ -tekijä palokuormalle EN1990, annex C:n [10] esitettyyn menetelmään ja luotettavuusanalyysiin perustuen. Tämä menetelmä on esitetty tiivistetysti jäljempänä luvussa *Menetelytapa*.

Tekijä $\gamma_{q,f}$ on jaettu osatekijöihin δ_{q1} , δ_{q2} , δ_{ni} , jotka ottavat huomioon palo-osaston koon, rakennustyyppin ja aktiiviset palontorjuntalaitteistot. Ominaispalokuorma $q_{f,k}$ pitää kertoa tekijällä $\gamma_{qf} = \delta_{q1}\delta_{q2}\delta_{ni}$, jotta saadaan palokuorman mitoitusarvo $q_{f,d}$.

Palokuorman mitoitusarvoa käytetään luonnollisen palon malleissa (ks. luku Palonkehityksen laskenta), jotta saadaan määritettyä mitoittava parametrisen palokäyrä.

Tilastot

Tämä tilastollinen tutkimus perustuu seuraaviin tietoihin [11]:

- Sveitsi: Yksityiskohtaiset tiedot ja analyysit melkein kaikista yli 1.000.000 Sveitsin frangin vahingot aiheuttaneista tulipaloista Bernissä vuosina 1986–1995
- Ranska: teollisuusrakennuksissa esiintyneet palot tammikuusta 1983 helmikuuhun 1984 ja kaikki palokunnan pelastustehtävät vuodelta 1995 (3.253.855 tehtävää, joista 312.910 oli tulipaloja)

- Hollanti: palot teollisuusrakennuksissa tammikuusta 1983 tammikuuhun 1985
- Suomi: kaikki vuoden 1995 rakennuspalot (2.109 paloa rakennusten kokonaismäärästä 1.150.494). Projektin [18] puiteissa on Suomen tilastotietojen osalta lisäksi täydennetty tietoja vuosilta 1996–1999 perustuen mm. Sisäasiainministeriön ”Pronto” tietokantaan ja muihin asiaan liittyviin tilastotietokantoihin liittyen
- Luxemburgin palolaitoksen raportit vuosilta 1995 ja 1997
- kansainvälistä tietoa eri tietolähteistä ja eri tavoilla sprinklerien toiminnasta. Tietokanta sprinklereistä koottiin tiedoista jotka oli kerätty USA:sta, Suomesta, Saksasta, Ranskasta, Australiasta ja Isosta Britanniaista [13].

Seuraavat tilastot ovat pääosin asuinrakennuksille, toimistoille ja teollisuusrakennuksille, joita on käsitelty menetelmän kehittämiseen. Taulukossa 5.6 on tätä menetelmää laajennettu myös toisiin rakennusten käyttötarkoituksiin.

Todennäköisyydet

Tapahtumapuualanalyysi

Tapahtumapuulla (ks. kuva 5.1) voidaan kuvata palon alkamisesta lähtien palon kehittymistä käyttäen taulukon 5.1 suositusarvoja.

Palon esiintyminen ja palonkehitys

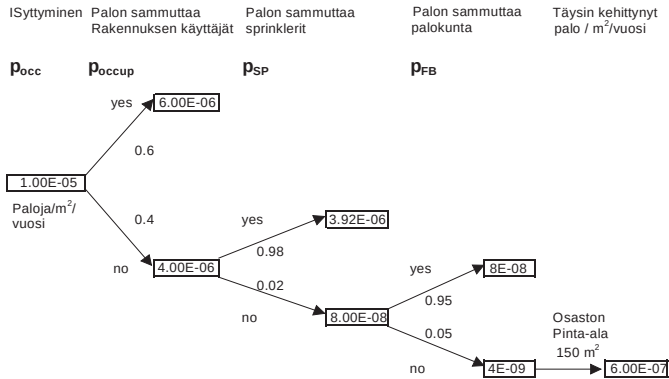
Todennäköisyys vakavalle palolle/vuosi, joka voi vaarantaa rakenteellisen stabiiliuden voidaan ilmaista kaavalla (5.1):

$$p_{fi} = p_1 p_2 p_3 A_{fi} p_4 \quad (5.1)$$

jossa

- p_1 on vakavan palon todennäköisyys sisältäen asukkaiden ja paikallisen palokunnan vaikutuksen (lattiapinta-alaa m^2 ja vuotta kohti)
- p_2 on vähennyskerroin, joka riippuu palokunnan tyypistä ja vasteajasta (p_2 on myös todennäköisyys palokunnan epäonnistumiselle palontorjunnassa)
- p_3 on vähennyskerroin, jos rakennuksessa on automaattinen palonilmaisin (savu tai lämpö) ja automaattinen hälytys palokuntaan
- p_4 on vähennyskerroin, jos rakennuksessa on sprinklaus (p_4 on myös todennäköisyys sprinklerien epäonnistumiselle palon sammutuksessa)
- A_{fi} on palo-osaston pinta-ala.

Huom: Tekijä p_1 sisältää asukkaiden ja paikallisen palokunnan toiminnan palonkehityksen esitämiseksi vakavaksi paloksi. Se ei siis ole palon esiintymisen todennäköisyys.



Kuva 5.1. Esimerkki tapahtumapuusta palonkehitykselle toimistossa, jossa osaston koko on 150 m².

Taulukko 5.1. Tapahtumapuun tekijät.

		Asuinrakennus	Toimisto	Teollisuus
Palon esiintyminen [1/(m ² ,vuosi)]	P _{occ}	30 · 10 ⁻⁶	10 · 10 ⁻⁶	10 · 10 ⁻⁶
Palon sammuttanut asukas	P _{occup}	0,75	0,60	0,45
Palon sammuttanut sprinkler	P _{SP}	ks. Taulukko 5.5		
Palon sammuttanut paikallinen palokunta	P _{FB}	0,90–0,95	0,90–0,95	0,80–0,90

Palokunnan tyyppin, vasteajan, automaattisen palonilmaisimen toiminnan ja hälytyksen (p₂, p₃) vaikutuksia ei ole huomioitu Taulukossa 5.1., Taulukossa 5.2 p₁ on itse asiassa p_{occ}(1-p_{occup}) (1-p_{FB}).

Lähteiden [11, 18] mukaisesti, seuraavissa taulukoissa esitettyjä arvoja suositellaan tekijöille p₁, p₂, p₃ ja p₄.

Taulukko 5.2. Palon syttymistiheys ja kasvu vakavaksi paloksi. Paikallinen palokunta otettu huomioon.

Käyttötapa	p ₁ [10 ⁻⁷ /(m ² ,vuosi)]
Toimisto	2–4
Asunto	4–9
Teollisuus	5–10

Taulukko 5.4. Vähennyskerroin automaattiselle palonilmaisimelle (savu tai lämpö) ja automaattiselle hälytykselle palokuntaan.

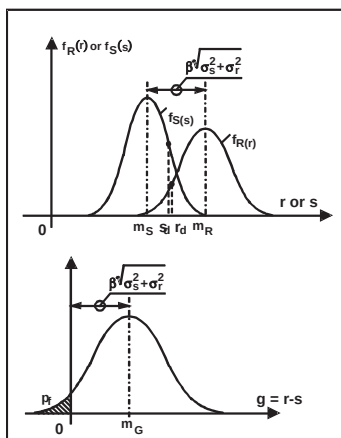
Aktiiviset välineet	p ₃
Savuilmaisimet	0,0625
Lämpöilmaisimet	0,25
Automaattinen hälytys palokunnalle	0,25

Taulukko 5.5. Vähennyskerroin sprinklerijärjestelmälle.

Sprinklerityyppi	p ₄
Normaali (määräysten mukainen)	0,02
Korkea taso (esim. Elektronisesti valvottu venttiili, kaksi toisistaan riippumatonta vesilähdettä)	0,01–0,005
Matala taso (ei määräysten mukainen)	≥ 0,05

Taulukko 5.3. Lisävähennyskerroin, joka riippuu palokunnan tyypestä ja palokunnan vasteajasta.

	Palokunnan toimintavalmiusaika hälytyksestä		
p ₂	≤ 10'	10' < t ≤ 20'	20' < t ≤ 30'
Palomiesten tyyppi			
Ammattilainen	0,05	0,1	0,2
Ei-ammattilainen	0,1	0,2	1



Kuva 5.2. Todennäköisyyksiin perustuva lähestymistapa.

$$p_f \leq p_t (= 7,23 \cdot 10^{-5}) \rightarrow \beta > \beta_t (= 3,8)$$

$$m_R - m_S \geq \beta \sqrt{\sigma_S^2 - \sigma_R^2} = \beta \frac{\sigma_S^2 - \sigma_R^2}{\sqrt{\sigma_S^2 - \sigma_R^2}}$$

$$\Rightarrow m_R - \frac{r_d}{\sqrt{\sigma_S^2 - \sigma_R^2}} \beta \sigma_R \geq m_S - \frac{s_d}{\sqrt{\sigma_S^2 - \sigma_R^2}} \beta \sigma_S$$

$$\Rightarrow r_d \geq s_d$$

Menettelytapa

Suunnitteluarvojen määrittäminen kuormille ja kestävyyksille. Varmuuskerroin Eurocodessa – peruseräatteen

Kestävyys R ja kuormitus S perustuvat tilastollisiin jakaumiin, jotka on määritelty keskihajontojen (σ_S , σ_R) ja keskiarvojen (m_S , m_R) avulla. Jotta taataan riittävä turvallisuustaso, on välttämätöntä, että vikaantuminen ($S > R$) esiintyy vain hyvin pienellä todennäköisyydellä p_f , joka on esitetty kuvassa 5.2 viivoitetulla alueella. Tätä aluetta voidaan merkitä luotettavuusluvulla β .

Eurocode järjestelmä vaatii normaaliolosuhteissa, rakennuksen elinkaaren aikana, suurimmalle vikaantumistodennäköisyydelle p_f arvon $7,23 \cdot 10^{-5}$, joka vastaa luotettavuusindeksiä β , arvoa 3,8.

Muuttujille S ja R, jotka vastaavat kuormitusta ja kestävyyttä, suunnitteluarvot ovat s_d ja r_d . Mitoituksessa on kuitenkin otettava huomioon eri kuormitukset (omapaino, muuttuvat kuormat, lumi, tuuli, maanjäristys...) ja kestävydet (betonin puristuskestävyys, teräksen myötöraja jne.), joten mitoitus ei ole ainoastaan kahden todennäköisyysluvun vertaamista toisiinsa. Tästä johtuen Eurocode järjestelmässä on käytetty osittain todennäköisyyksiin perustuvaa lähestymistapaa.

Tässä yksinkertaistetussa lähestymistavassa oletetaan:

$$\alpha_R = \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_S^2}} = 0,8 \text{ kestävyydelle} \quad (5.2)$$

$$\alpha_S = \frac{\sigma_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = (-0,7) \text{ primäärikuormille ja} \quad (5.3)$$

$$(-0,28) \text{ sekundäärikuormille}$$

$$\Rightarrow s_{d,i} = \text{Suunnitteluarvo} = m_{s,i} + 0,7 \beta \sigma_{s,i}$$

$$\Rightarrow r_{d,i} = \text{Suunnitteluarvo} = m_{r,i} - 0,8 \beta \sigma_{r,i}$$

Oletamalla vakioarvot painokertoimille $\alpha_{s,i}$, voidaan mitoitusarvot $s_{d,i}$ määritellä kuormituksille viittaamatta kestävyksiin, koska nämä mitoitusarvot riippuvat vain luotettavuusindeksistä β , tutkittavan suureen tilastollisesta keskiarvosta ja keskihajonnasta ja tietysti jakauman tyyppistä (ks. Kuva 5.2 [10]).

Näillä kuormitusten mitoitusarvoilla $s_{d,i}$ pyritään vaadittuun turvallisuustasoon. Jos β on esim. 3,8 kuten Eurocodessa, on vikaantumistodennäköisyys rakennuksen elinkaaren aikana $7,23 \cdot 10^{-5}$.

Tämän johdosta voidaan jokaiselle kuormitukselle määritellä varmuuskerroin γ , joka on mitoitusarvon ja ominaisarvon suhde:

$$\gamma = \frac{s_d}{s_k} \quad (5.4)$$

Tällä tavoin voidaan määritellä Eurocodessa annetut varmuuskertoimet: kuormituspuolella 1,35 ja 1,5 omalle painolle ja hyötykuormille ja kestävyyspuolella 1,1, 1,15 ja 1,5 vastaavasti rakenneteräkselle, betoniteräksille ja betonille [1, 16, 20, 24].

Seuraavassa on esitetty esimerkkinä raudoitusteräksen osavarmuuskertoimen γ_s arvon 1,15 laskenta [20]:

- $\beta = 3,8$; $\alpha_a = 0,8$
- Tilastollinen jakauma: logaritminen normaali-jakauma

- Variaatiokertoimet $\left(= \frac{\sigma}{m} \right)$:

V_R = variaatiokerroin mitoitussarvolle =

$$\sqrt{V_G^2 + V_m^2 + V_f^2} = 0,087$$

V_m = variaatiokerroin mallin epävarmuudelle = 0,05

V_G = variaatiokerroin elementin geometrialle = 0,05

V_f = variaatiokerroin mekaaniselle ominaisuudelle = 0,05

- Suunnitteluarvo $X_d = m_x \exp(-\alpha_R \beta V_R) = m_x \exp(-0,8 \beta V_R)$
- Ominaisarvo $X_k = m_x \exp(-k V_f)$, jossa $k = 1,645$ vastaa 5 % fraktiilia
- Varmuuskerroin

$$\gamma_s = \frac{X_k}{X_d} = \exp(0,8 \beta V_R - k V_f) =$$

$$\exp(0,8 \cdot 3,8 \cdot 0,087 - 1,645 \cdot 0,05) = 1,198$$

Tavoitearvo

EN 1990:ssä [22] on määritelty vikaantumistodennäköisyyden p_t raja-arvoksi $7,23 \times 10^{-5}$ rakennuksen elinkaaren aikana ($1,3 \cdot 10^6$ per vuosi). Tämä normaaliolosuhteissa käytetty turvallisuustasovaatimus ($\beta > 3,8$) on otettu käyttöön myös rakenteiden palomitoituksessa. Vaadittu paloturvallisuustaso voitaisiin itse asiassa myös eritellä osiin. Tätä ideaa on esitelty projektin loppuraportissa [11] (WG5, Annex B, kappale 2.8), jossa on esitetty tavoitteeksi ihmisten poistumisen vikaantumistodennäköisyydelle p_t [1/vuosi]:

$$p_t = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ normaali poistuminen } p_t \text{ [1/vuosi]}$$

$$p_t = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ vaikea poistuminen (sairaalat, jne.)}$$

$$p_t = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ mahdoton poistuminen (tornitalot ym.).}$$

Tätä ei ole sisällytetty todellisiin palo-olosuhteisiin perustuvaan (NFSC) lähestymistapaan. Se voisi johtaa joihinkin parannuksiin asiassa, mutta projektissa päätettiin käyttää jo yleisesti hyväksyttyä EN 1990:ssa esitettyä [10] arvoa.

Palomitoitus ja ehdollinen todennäköisyys

Normi EN 1990, Liite C [10], jossa kuvataan osin todennäköisyyksiin perustuvaa lähestymistapaa, jonka perusteella määritellään mitoitussarvot kuormille ja kestävyyksille, kattaa myös rakenteellisen palomitoituksen. Huoneenlämpötilassa varmuuskertoimet kuormille ja materiaaliominaisuuksille on määritetty osin todennäköisyyksiin perustuvalla menetelmällä, jossa oletetaan implisiittisesti, että rakenteen vikaantumistodennäköisyys p_t on pienempi kuin sallittu vikaantumistodennäköisyyden p_t arvo $7,23 \cdot 10^{-5}$ rakennuksen elinkaaren aikana, mikä on yhtäläinen turvallisuuskertoimen β arvon 3,8 kanssa.

$$p_t \text{ (vikaantumistodennäköisyys)} \leq p_t \text{ (sallittu todennäköisyys)} \quad (5.5)$$

Palotilanteessa suurin kuormitus aiheutuu palokuormasta, jonka määrä voidaan ilmaista yksiköillä kg puuta tai MJ. Palokuorma vaikuttaa luonnollisesti vain palotilanteessa. Palokuorma vaikuttaa rakenteisiin tietyllä todennäköisyydellä p_{fi} , joka on tekijöiden p_{start} (todennäköisyys palon syttymiselle) ja p_{spread} (todennäköisyys, että palo lieskahtaa tai kehittyy täysin kehittyneeksi paloksi) tulo.

Palotilanteessa, joka on onnettomuustilanne, yhtälö (5.5) on $p_{f,fi}$ (vikaantumistodennäköisyys palotilanteessa) $\times p_{fi}$ (palon esiintymisen todennäköisyys) $\leq p_t$ (sallittu todennäköisyys).

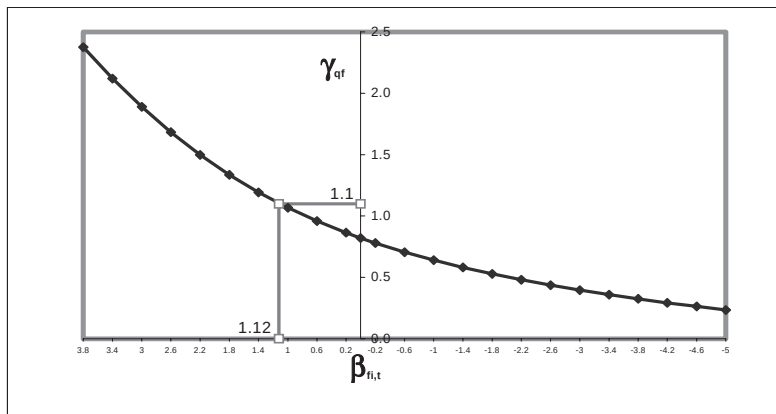
Se voidaan kirjoittaa:

$$p_{f,fi} \leq (p_f/p_{fi}) \Rightarrow \beta_{f,fi} \geq \beta_{fi,t} \quad (5.6)$$

jossa suurin sallittu arvo p_t on $7,23 \cdot 10^{-5}$, joka korreloi luotettavuusluvun β_t arvoon huoneenlämpötilassa. Tekijälle β_t ei ole erillistä arvoa palotilanteessa, koska palotilanteessa sallittu vikaantumistodennäköisyys riippuu yhtälön (5.6) mukaan palon esiintymistodennäköisyydestä p_{fi} . Kun tunnetaan $\beta_{fi,t}$, voidaan palokuorman mitoitussarvo määrittää seuraavan luvun mukaisesti.

Palokuorman mitoitussarvo ja kokonaisvarmuuskerroin δ

Todennäköisyyslaskelmat ovat osoittaneet (viite [11], kappale 7.4), että normaalitilanteen kuormituksen painokerroin vähenee palotilanteessa ja palokuormasta tulee pääsääntöisesti vaikuttava tekijä. Näiden laskelmien mukaan kertoimen α_{qt} arvona käytetään arvoa (-0,9). Palokuorman tiheyksille julkaisussa ”The Application of Fire Safety Engineering Principles to the Safety in Buildings” [14] ja Prof. Fontanan analyysissä [15] annetut arvot sopivat hyvin Gumbelin jakaumaan. Variaatiokerroimeksi V_{qt} on valittu 0,3 [11].


 Kuva 5.3. Osavarmuustekijän γ_{qf} riippuvuus luotettavuusindeksistä β_{fi} .

Palokuorman karakteristiseksi arvoksi on valittu palokuormajakauman 80 % fraktiilia vastaava arvo eli:

$$q_{f,d} = m_{af} \left\{ 1 \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_{af} \left[0,577 + \ln \left(-\ln \phi \left(0,9 \beta_{fi,t} \right) \right) \right] \right\} \quad (5.7)$$

jossa m_{qf} on palokuorman keskiarvo ja ϕ normaalijakauman funktio.

Kuten julkaisussa [16] on esitetty, osavarmuuskertoimen arvoksi on saatu $\gamma_{SD} = 1,05$.

Valitsemalla ominaisarvoksi $q_{f,k}$ (80 % fraktiili) (ks. Liite E, EN1991-1-2 [1] ja [11]), palokuorman osavarmuustekijäksi γ_{qf} saadaan:

$$\gamma_{qf} = \frac{q_{f,d}}{q_{f,k}} \cdot 1,05 \frac{\left\{ 1 \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_{qf} \left[0,577 + \ln \left(-\ln \phi \left(0,9 \beta_{fi,t} \right) \right) \right] \right\}}{\left\{ 1 \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_{qf} \left[0,577 + \ln \left(-\ln \phi \left(0,9 \right) \right) \right] \right\}} \quad (5.8)$$

$$= 2,38, \text{ kun } \beta = 3,8 \text{ ja } 0,82, \text{ kun } \beta = 0$$

Osavarmuustekijän γ_{qf} riippuvuus luotettavuusindeksistä $\beta_{fi,t}$ on esitetty kuvassa 5.3.

Luotettavuusindeksi $\beta_{fi,t}$ voidaan laskea vakavan palon todennäköisyydestä p_{fi} seuraavasti:

$$\beta_{fi,t} = \phi^{-1} \left(\frac{p_t}{p_{fi}} \right) = \phi^{-1} \left(\frac{7,23 \cdot 10^{-5}}{p_{fi}} \right)$$

ϕ^{-1} on standardoidun normaalijakauman kertymäfunktion käänteisfunktio

Kuvan 5.3 avulla voidaan arvioida osavarmuustekijä γ_{qf} palokuormalle. Kuva osoittaa, että tekijän γ_{qf} määrittäminen käyttäen yksinkertaistettua oletusta $\alpha = (-0,9)$ todellisten todennäköisyysslaskelmien sijaan, on järkevää paloteknisen suunnittelun kannalta relevantilla alueella ($-\infty < \beta_{fi} < 2,5$).

Menetelmässä:

- määritetään vakavan palon esiintymistodennäköisyys p_{fi}
- lasketaan (p_t/p_{fi})
- määritetään turvallisuusindeksi $\beta_{fi,t}$
- saadaan määritettyä tekijä δ_{qf} .

Tässä menetelmässä on tekijä γ_{qf} jaettu kolmeen osatekijään δ_{q1} , δ_{q2} ja δ_{ni} jotta voidaan arvioida palo-osaston koon, palon syttymisriskin ja aktiivisen palontorjunnan keinojen vaikutus todennäköisyyteen p_{fi} (Taulukko 5.6).

Kun tekijät δ_{q1} , δ_{q2} ja δ_{ni} on määritetty, palokuorma $q_{f,d}$ voidaan laskea:

$$q_{f,d} = \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_{ni} \cdot q_{f,k}$$

Suunnittelupalokuormaa käytetään seuraavassa luvussa esitetyissä laskentatyökaluissa.

Taulukko 5.6. Tekijöiden δ arvoja [1].

Palotilan lattiapinta-ala A_r [m ²]	Palon syttymisriski δ_{q1}	Palon syttymisriski δ_{q2}	Käyttötapa-esimerkkejä
25	1,10	0,78	taidegalleria, museo, uima-allas
250	1,50	1,00	toimisto, asunto, hotelli, paperiteollisuus
2500	1,90	1,22	koneita ja laitteita valmistava tehdas
5000	2,00	1,44	kemian laboratorio, maalaamo
10000	2,13	1,66	ilotulite- tai maalitehdas

δ_{n1} Aktiivisten palontorjuntatoimenpiteiden vaikutus

Automaattinen palonsammutus		Automaattinen palonilmaisui		Manuaalinen palonsammutus			
Autom. sprinkleri-järjestelmä	Toisistaan riippumatt. vesilähteitä 0 / 1 / 2	Autom. palovaroitin, joka havaitsee lämmön/savun	Autom. hälytys ilm.palosee lämmön/kunnalle	Työ: muualta tuleva/paikan palokunta	Turvalliset tuloreiitit	Palo-sammutusvälineet	Savun-poisto-järjestelmä
δ_{n1}	δ_{n2}	$\delta_{n3} / \delta_{n4}$	δ_{n5}	$\delta_{n6} / \delta_{n7}$	δ_{n8}	δ_{n9}	δ_{n10}
0,61	1,0 / 0,87 / 0,7	0,87 / 0,73	0,87	0,61 / 0,78	0,9 tai 1 tai 1,5	1,0 tai 1,5	1,0 tai 1,5

6 Palonkehityksen laskenta

Kun palonkehitystä simuloidaan numeerisesti, voidaan joitain yksinkertaistuksia tehdä palodynamiikan osalta. Tässä kappaleessa selitetään mallit, joita voidaan soveltaa lieskahdusta edeltävään paloon (paikalliset palon mallit ja 2 vyöhykkeen mallit) ja lieskahtaneeseen, eli täysin kehittyneeseen paloon.

Paikallinen palo

Paikallisen palon mallissa oletetaan palamis- tuotteiden kertyvän ja kehittävän tilan yläosaan kuumen tasalämpöisen vyöhykkeen ja alaosaan viileämmän vyöhykkeen. Tätä tilannetta kuvataan hyvin kahden vyöhykkeen mallilla, joka on käyttökelpoinen lieskahdusta edeltävässä palotilanteessa. Kaasun lämpötilan laskemisen lisäksi näitä malleja käytetään arvioimaan savun leviämistä rakennuksessa, henkilöturvallisuutta savuputjan korkeuden funktiona, myrkyllisten kaasujen pitoisuuksia, lämpövuon säteilemällä siirtyvää osaa ja näkyvyyttä palossa.

Lämpökuormitus vaakarakenteille palon yläpuolella riippuu myös niiden etäisyydestä liekkeihin. Sitä voidaan arvioida erityisillä tähän kehitetyillä menetelmillä, kuten Heskestadtin ja Hasemin malleilla[17].

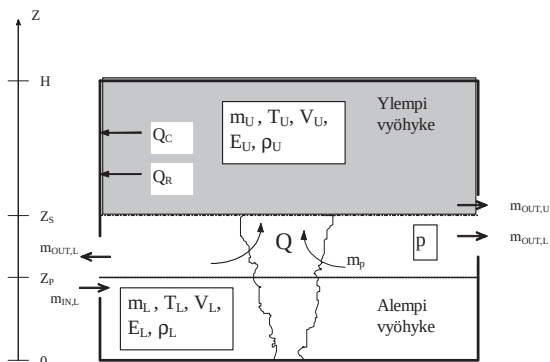
Kahden vyöhykkeen mallit

Vyöhykemalleiksi nimitetään numeeriseen laskentaan perustuvia ohjelmia, jotka laskevat kaasun lämpötilan ajan funktiona differentiaaliyh- tälöistä, jotka kuvaavat massa- ja energiavirtaa eri vyöhykkeille palo-osastossa. Ne perustuvat olettamukseen, että kussakin vyöhykkeessä lämpötila on jakautunut tasaisesti.

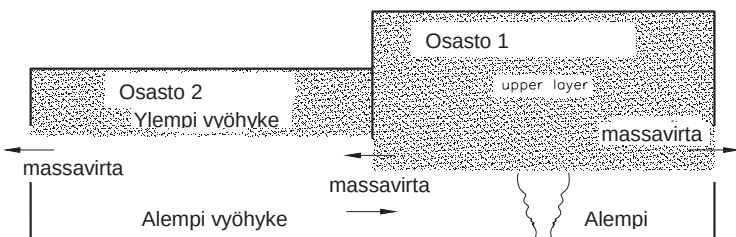
Vyöhykemallit eivät pelkästään laske tilan kaa- sun lämpötilan kehitystä, vaan myös esimerkik- si seinien lämpötiloja ja kaasun virtauksia au- koista. Vyöhykemallit tarvitsevat lähtötietoina:

- kuvauksen rakennuksen geometriasta, kuten tilan dimensiot, aukot ja väliseinät
- rajoittavien pintojen termiset ominaisuudet
- mitoituspalon tiedot, kuten lämmönvapautu- misnopeus, paloteho, palamislämpö.

Kahden vyöhykkeen mallissa massan ja energi- an tasapainoyhtälöitä käsitellään vyöhykkeit- täin, mutta vyöhykkeiden väliset virtaukset ote- taan huomioon. Tuloksena saadaan kunkin vyö- hykkeen kaasun lämpötila, ympäröivien pinto- jen lämpötilat ja virtaukset aukoista. Tärkeä tu- los on vyöhykkeen paksuuden kehitys ajan suh- teen. Alemman vyöhykkeen paksuudella on suuri merkitys tilan muuttumisesta vaaralliseksi



Kuva 6.1. Osasto kahden vyöhykkeen mallissa.



Kuva 6.2. Palo-osasto usean osaston kaksivyöhykemallissa.

ihmisille, koska se pysyy viileämpänä eikä sisällä yhtä paljon vaarallisia palamistuotteita. Kuvassa 6.1 esitetään, miten palo-osasto mallinnetaan kahden vyöhykkeen mallilla.

Kuva 6.1 on tyypillinen yksinkertainen tilanne, jossa tilan massa ja energiavirrat ovat vain tilan ja ulkopuolisen ympäristön välisiä. Tällaisilla malleilla voidaan mallintaa monimutkaisempiakin rakennuksia, joissa massa- ja energiavirtoja on myös sekä ulkopuolisen ympäristön, että rakennuksen sisällä eri osien välillä. Tämä on erityisen tärkeää kun arvioidaan ihmisille hengenvaarallisten savukaasujen leviämistä muihin osastoihin rakennuksissa. Tällainen tilanne on esitetty kuvassa 6.2.

Heskestadin menetelmä

Paikallisen palon aiheuttama lämpökuormitus voidaan laskea käyttäen Heskestadin menetelmää [1]. Eroja syntyy riippuen liekin korkeuden suhteesta huonekorkeuteen.

Paikallisen palon liekin pituus L_f (ks. Kuva 6.3) lasketaan seuraavasti:

$$L_f = -1,02 D + 0,0148 Q^{2/5}$$

Kun liekki ei törmää tilan kattoon ($L_f < H$; ks. Kuva 6.3) tai kun palo tapahtuu avoimessa tilassa, lämpötila $\Theta_{(z)}$ pitkin palopatsaan pystysuuntaista symmetria-akselia saadaan kaavasta:

$$\Theta_{(z)} = 20 + 0,25 Q_c^{2/5} (z - z_0)^{-5/3}$$

jossa

D on palon läpimitta [m], ks. Kuva 6.3

Q on lämmönvapautumisnopeus [W]

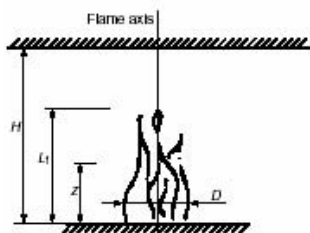
Q_c on lämmönvapautumisnopeuden kuljettumalla siirtyvä osa [W], oletuksena $Q_c = 0,8Q$

z on korkeus [m] liekin akselia (Flame axis) pitkin, ks. Kuva 6.3

H on palonlähteen ja katon välinen etäisyys [m], ks. Kuva 6.3

Hasemin menetelmä [1, 17]

Hasemin menetelmä [1, 17] on yksinkertainen laskentatyökalu arvioimaan paikallisen palon vaikutusta liekin yläpuolella oleviin vaakarakenteisiin. Se perustuu Japanissa tehtyihin polttokokeisiin (the Building Research Institute in Tsukuba).



Kuva 6.3. Paikallisen palon malli. Liekit eivät osu kattoon.

Tiedot, jotka tarvitaan menetelmän soveltamiseen:

- Q palon lämmönvapautumisnopeus [W]
 H_f sisätilan korkeus [m]
D palon tehollinen halkaisija [m]
 H_s lattiapinnan ja palolähteen välinen etäisyys [m].

Muuttujat:

- H palolähteen etäisyys katosta [m]
 Q^* lämmönvapautumisnopeus [-]
 Q_H^* lämmönvapautumisnopeus [-]
 z' virtuaalisen lämmönlähteen asema [m]
 L_H lieskan leveys katossa [m]
r vaakasuora etäisyys palon keskipisteestä [m].

Laskentamenettely:

$$\text{Laske } H \quad H = H_f - H_s \quad (6.1)$$

$$\text{Laske } Q^* \quad Q^* = \frac{Q}{1,11 \times 10^6 D^{2,5}} \quad (6.2)$$

$$\text{Laske } Q_H^* \quad Q_H^* = \frac{Q}{1,11 \times 10^6 H^{2,5}} \quad (6.3)$$

$$\text{Laske } z' \quad z' = 2,4 D (Q^{*2/5} - Q^{*2/3}) \quad Q^* < 1,00 \quad (6.4)$$

$$z' = 2,4 D (1,00 - Q^{*2/5}) \quad Q^* \geq 1,00 \quad (6.5)$$

$$\text{Laske } (L_H + H)/H \quad \frac{L_H + H}{H} = 2,90 Q_H^{*0,33} \quad (6.6)$$

Laske L_H edellisten yhtälöiden tulosten ja arvon H avulla.

Laske vuon arvo q'' [kW/m²] etäisyydellä r:

$$q'' = 100; y < 0,30 \quad (6.7)$$

$$q'' = 136,30 - 121,00 y; 0,30, 0 < y < 1,0 \quad (6.8)$$

$$q'' = 15 y^{-3,7}; y > 1,0 \quad (6.9)$$

$$\text{jossa } y = \frac{r + H + z}{L_H + H + z} \quad (6.10)$$

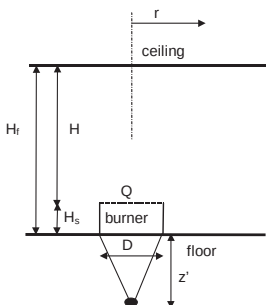
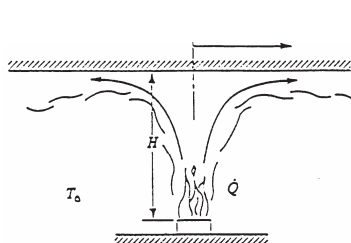
Vuon q'' arvo pienenee y:n funktiona ja kasvaa Q:n funktiona. Kuvassa. 6.5 nämä funktiot on esitetty tapaukselle:

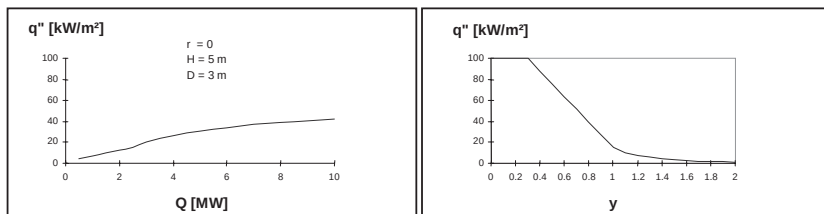
$$r = 0 \quad H = 5 \text{ m} \quad D = 3 \text{ m}$$

Kaksivyöhykemallin ja paikallisen palon mallin yhdistelmä

Paikallisessa palossa kaasun lämpötilan jakautuminen voidaan arvioida kaksivyöhykemallilla. Tässä mallissa oletetaan kaasun lämpötilan olevan tasaisen kussakin vyöhykkeessä. Kuumen vyöhykkeen lämpötilan arvio pitää yleisesti paikkansa kun tarkastellaan kokonaistilannetta: savun määrä osastossa, lieskahduksen todennäköisyys, katon tai alakaton romahtaminen, jne.

Kun arvioidaan paikallista rakenteen käyttäytymistä palon yläpuolella, voi kaksivyöhykemallin oletus tasaisesti jakautuneesta lämpötilasta johtaa epävarmalla puolella olevaan tulokseen (= liian matala lämpötila) ja mallia pitää tutkia yhdessä paikallisen palon mallin yhtälöiden (luvussa Hasemin menetelmä) kanssa. Lämpötilat palkin lähellä, palkin pituussuun-





Kuva 6.5. q'' y:n ja Q :n funktiona.

nassa, arvioidaan sen mallin mukaan, joka antaa tälle pisteelle korkeimman lämpötilan.

Savupatjan korkeus ja kuumien kaasujen lämpötilat teräsrakenteen tasolla eri etäisyyksillä liekistä voidaan laskea TEFINAF [8] mallilla. Tämä malli yhdistää kaksivyöhykemallin antamat kuumen vyöhykkeen korkeuden ja keskimääräisen lämpötilan ja paikallisen palon yhtälöiden antaman lämpötilapiikin liekin yläpuolella ja eri etäisyyksillä siitä.

Täysin kehittynyt palo

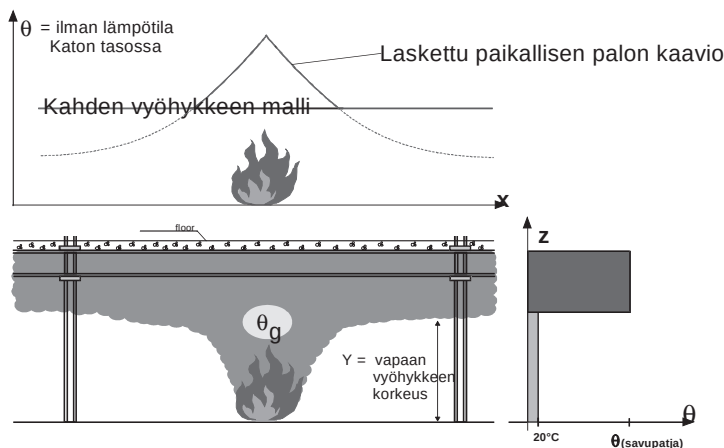
Täysin kehittyneen palon mallinnukseen rakennuksessa on olemassa lukuisia erityyppisiä malleja. Yleisimmät näistä on kuvattu tässä kappaleessa. Luonnollisen palon malli on vaihtoehto nimellisille (standardi-)paloille, joita kuvataan eri standardeissa (ISO, ASTM, hiilivetykäyrät..).

Parametriset palot

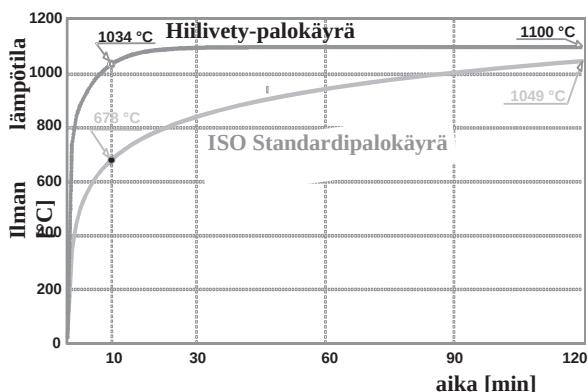
Parametrisessa palossa otetaan huomioon tärkeimmät fysikaaliset ilmiöt, jotka vaikuttavat palon kehitykseen tutkittavassa rakennuksessa. Myös parametrista paloa kuvataan aika-lämpötiläkäyrällä, mutta siinä on otettu huomioon todellista tilannetta kuvaavia seikkoja. Miltei kaikissa kirjallisuudesta löytyvissä parametrisen palon kuvauksissa ovat huomioon otettavat parametrit seuraavat:

- tilan geometria
- palokuorma
- seinien ja kattojen aukot
- tilaa rajoittavien rakenteiden ja pintojen ominaisuudet.

Parametrisen palon mallit perustuvat olettaukseen, että osaston lämpötila on tasainen, mikä rajoittaa niiden käytön lieskahduksen jälkeiseen, täysin kehittyneeseen paloon pienehköissä tiloissa. Ne ovat kuitenkin askel kohti todellisen palon tarkastelua, vaikka niissä käyt-



Kuva 6.6. Kaksivyöhykemallin ja paikallisen palon mallin yhdistelmä.



Kuva 6.7. Standardi ja Hiilivety -palokäyrät.

tään yksinkertaistettuja analyttisiä lausekkeitä, eli ne eivät vaadi kehittyneitä laskentatyökaluja.

Eurocode 1 osassa 1–2 [2] on esitetty parametrisen palon aika-lämpötilakäyrän laskentamalli liitteessä A tällaiselle palolle. Normin vanhassa versiossa osaston pinta-ala oli enintään 100 m², mutta nykyisen ehdotuksen mukaan se on enintään 500 m², kun katossa ei ole aukkoja ja kun tilan korkeus on enintään 4 m.

Tässä projektissa tehtiin joitain korjauksia uuteen normiehdotukseen. Seuraavassa on esitetty parannettu laskentamalli, joka on myös normin EN 1991 osan 1–2 liitteessä A.

$$\theta_g = 20 + 1325(1 - 0,324 e^{-0,2 t^*} - 0,204 e^{-1,7 t^*} - 0,472 e^{-19 t^*}) \quad (6.11)$$

$$\begin{aligned} &\text{jossa} \\ &\theta_g \text{ on palotilan kaasun lämpötila } [^{\circ}\text{C}] \\ &t^* = t \times \Gamma [\text{h}] \end{aligned} \quad (6.12)$$

$$\begin{aligned} &\text{jossa edelleen} \\ &t \text{ aika } [\text{h}] \\ &\Gamma = [O/b]^2 / (0,04/1160)^2 [-] \end{aligned} \quad (6.13)$$

$$\begin{aligned} &O \text{ aukkotekijä: } A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t [m^{1/2}] \\ &\text{seuraavin rajoin: } 0,02 \leq O \leq 0,20 \end{aligned} \quad (6.14)$$

$$b \text{ tekijä } b = \sqrt{(\rho c \lambda)}$$

$$\text{seuraavin rajoin: } 100 \leq b \leq 200 [J/m^2 s^{1/2} K]$$

$$\rho \text{ tilaa ympäröivän rakenteen tiheys } [kg/m^3]$$

$$c \text{ tilaa ympäröivän rakenteen ominaislämpökapasiteetti } [J/kg K]$$

$$\lambda \text{ tilaa ympäröivän rakenteen lämmönjohtavuus } [W/m K]$$

$$A_v \text{ kaikissa seinissä olevien pystyaukkojen kokonaisala } [m^2]$$

h_{eq} kaikissa seinissä olevien ikkunoiden korkeuksien painotettu keskiarvo [m]

A_t vaipan kokonaispinta-ala (seinät, katto ja lattia, aukot mukaan lukien) [m²].

HUOM. Tapauksessa $\Gamma = 1$ yhtälö (A.1) on liikkeellisesti sama kuin standardipalon lämpötila-aikakäyrä.

Suuren b arvon laskenta on esitetty kappaleessa Seinä: termiset ominaisuudet.

Kuumenemisvaiheen korkein lämpötila θ_{max} esiintyy arvolla $t^* = t^*_{max}$

$$\begin{aligned} &t^*_{max} = t_{max} \Gamma [\text{h}] \\ &\text{jossa } t_{max} = \max [(0,2 \cdot 10^{-3} q_{t,d} / O); t_{lim}] [\text{h}] \end{aligned} \quad (6.15)$$

$q_{t,d}$ on vaipan kokonaispinta-ala A_t kohti lasketun palokuorman tiheyden mitoitusarvo, jolloin $q_{t,d} = q_{f,d} A_f / A_t$ [MJ/m²]. Seuraavia rajoja ei saa rikkoa: $50 \leq q_{t,d} \leq 1000$ [MJ/m²].

$q_{f,d}$ on lattian pinta-ala A_f kohti lasketun palokuorman tiheyden mitoitusarvo [MJ/m²], joka saadaan liitteestä E.

t_{lim} saadaan kaavasta (10), yksikkönä [h].

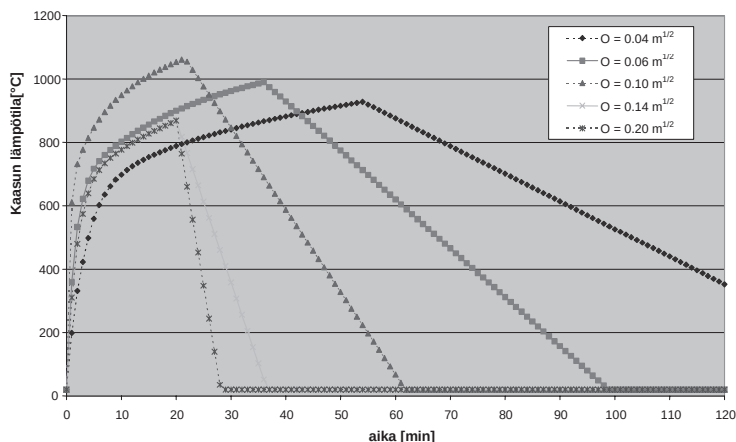
HUOM. Korkeinta lämpötilaa vastaavan ajanhetken t_{max} määrää t_{lim} , jos palo on palavan aineen määrän rajoittama. Jos hetken t^*_{max} määrää $(0,2 \cdot 10^{-3} q_{t,d} / O)$, palo on hapensaannin rajoittama.

$$O_{lim} = 0,1 \cdot 10^{-3} q_{t,d} / t_{lim} \quad (6.16)$$

$$\text{Kun } t_{max} = t_{lim}, \text{ niin yhtälössä (6.11)} \quad (6.17)$$

$$\text{käytetty } t^* \text{ korvataan suurella } t^* = t \Gamma_{lim} [\text{h}]$$

$$\Gamma_{lim} = [O_{lim} / b]^2 / (0,04/1160)^2 \quad (6.18)$$



Kuva 6.8. Esimerkki parametrusten palojen käyrästä.

Jos ($O > 0,04$ ja $q_{t,d} < 75$ ja $b < 1160$), niin kaasuvassa (6.18) oleva Γ_{lim} on kerrottava kertoimella k , joka saadaan kaavasta:

$$k = 1 + \left(\frac{O - 0,04}{0,04} \right) \left(\frac{q_{t,d} - 75}{75} \right) \left(\frac{1160 - b}{1160} \right) \quad (6.19)$$

$$\Gamma_{lim} = k [O_{lim}/b]^2 / (0,04/1160)^2 \quad (6.20)$$

Kun palo kehittyy hitaasti, $t_{lim} = 25$ min; palon kehittyessä keskimääräisellä nopeudella $t_{lim} = 20$ min ja palon kehittyessä nopeasti $t_{lim} = 15$ min.

HUOM. Ks. palon kehittymisnopeutta koskevaa opastusta EN 1991-1-2 liitteen E taulukosta E.5.

Jäähymisvaiheen lämpötila-aikakäyrät saadaan kaavoista:

$$\theta_{\gamma} = \theta_{max} - 625 (t^*_{max} - t^*_{max} x), \quad \text{kun } t^*_{max} \leq 0,5 \quad (6.21)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250 (3 - t^*_{max})(t^* - t^*_{max} x), \quad \text{kun } 0,5 < t^*_{max} < 2 \quad (6.22)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250 (t^*_{max} - t^*_{max} x), \quad \text{kun } t^*_{max} \geq 2 \quad (6.23)$$

johon t^* saadaan kaavasta

$$t^*_{max} = (0,2 \cdot 10^{-3} q_{t,d} / O) \Gamma$$

$$x = 1,0, \text{ jos } t_{max} < t_{lim} \text{ tai } x = t_{lim} \Gamma / t^*_{max}, \text{ jos } t_{max} > t_{lim}$$

Esimerkki tuloksista (palokuorma $q_{t,d} = 180$ MJ/m², $b = 1.160$ J/m²s¹/²K, aukkotekijä $O = 0,04$ m¹/²...0,20 m¹/²) on esitetty kuvassa 6.8.

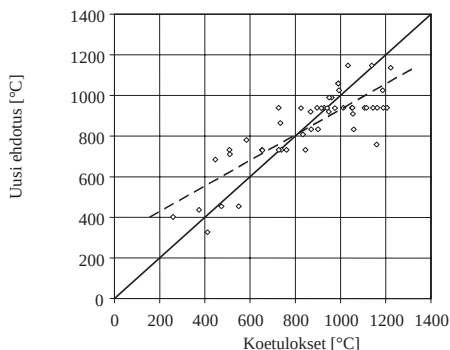
Parametrinen palon mallia on verrattu koetuloksiin. Kuva 6.9 esittää kaasun maksimilämpötilaa palossa. Korrelaatiokerroin, joka oli aikaisemman Eurocode kaavan mukaan lasketuille arvoille 0,19 on nyt 0,83.

Vyöhykemallit

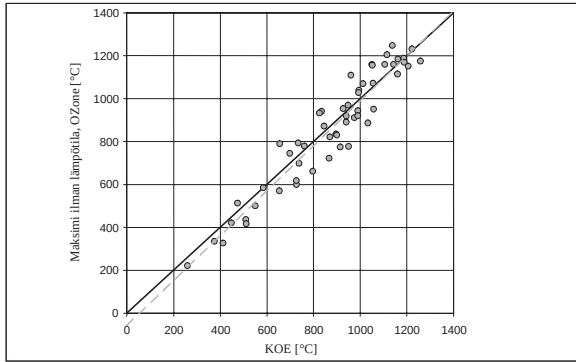
Vyöhykemallit on esitelty jo edellä, missä kuvailtiin lyhyesti kaksivyöhykemalli. Kaksivyöhykemallin sovellusalue on palon kehitysvaihe (paikallinen palo) ennen lieskاهدusta. Täysin kehittyneelle palolle käytetään yksivyöhykemallia.

Yhden vyöhykkeen malli

Yksivyöhykemalli perustuu oletukseen, että palon aikana kaasun lämpötila on tasainen koko osastossa. Yksivyöhykemallit soveltuvat lieskahtaneisiin, täysin kehittyneisiin paloihin. Vyöhykemallit vaativat yksityiskohtaisempia tietoja kuin parametriset palomallit. Kuvasta 6.10 nähdään, miten osastopalo on mallinnettu. Kuvassa on esitetty energian ja massan tasapainoyhtälöt.



Kuva 6.9. Kaasun maksimilämpötila osastossa.



Kuva 6.9. Kaasun maksimilämpötila osastossa.

NFSC 1 ja 2 projektien [11,12] aikana kehitettiin Liègen yliopistossa Ozone- yksivyoähykemalli.

Yhden- ja kahden vyoähykkeen mallien yhdistely

Kun palon ominaisuudet, kuten lämmönvapautumisnopeus, tilan geometria, tilaa rajaavien pintojen ominaisuudet, on määritelty, on valittava sovellettava luonnollisen palon malli kyseessä olevaan tapaukseen.

Tässä oletetaan, että ensimmäinen käytettävä sovellus on kaksivyoähykemalli. On myös tiedettävä reunaehdot, missä tapauksissa siirrytään yksivyoähykemalliin.

Kaksivyoähykemallin tulokset annetaan kahden päämuuttujan muodossa:

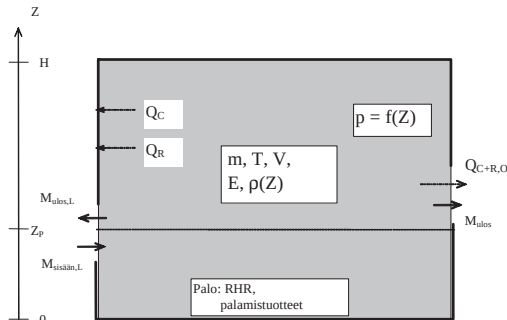
- ylempään, kuuman vyoähykkeen lämpötila T_u
- viileämmän vyoähykkeen korkeus H_i

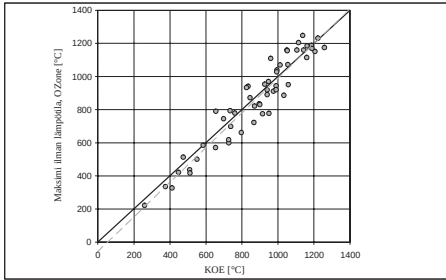
Nämä kaksi muuttujaa säätelevät simulointia vyoähykemalleilla. Seuraavat ehdot rajoittavat kaksivyoähykemallin käyttöä:

- ehto 1 (C1): $T_u > 500^{\circ}\text{C}$
palamistuotteiden korkea lämpötila (yli 500°C) johtaa tilan lieskahdukseen;
- ehto 2 (C2): $H_i < H_q$ ja $T_u > T_{\text{ignition}}$
Alemman viileän vyoähykkeen madaltuminen aiheuttaa sen, että palava materiaali on kuumassa vyoähykkeessä, joka voi aiheuttaa koko osastossa olevan palavan materiaalin syttymisen
- ehto 3 (C3): $H_i < 0,1 H$
Alempi vyoähyke kutistuu hyvin pieneksi, jolloin ei voida olettaa ilmiöiden noudattavan kaksivyoähykemallin mukaista käyttäytymistä;
- ehto 4 (C4): $A_{fi} > 0,5 A_f$
palavan alueen pinta-ala on liian suuri verrattuna lattian pinta-alaan, jolloin palon ei voida olettaa olevan paikallinen.

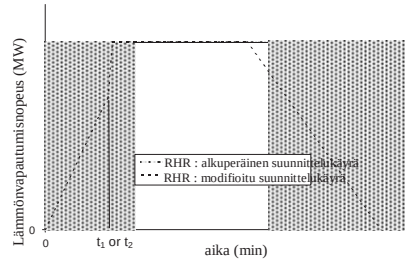
Ehdot 1 ja 2 johtavat lämmönvapautumisnopeuden modifiointiin, joka on esitetty kuvassa 6.13.

Edellä esitetty lähestymistapa on esitetty kaaviona kuvassa 6.14.

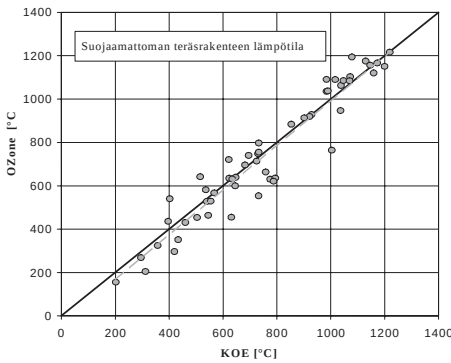




Kuva 6.11.



Kuva 6.13. Lämmönvapautumisnopeuden suunnittelukäyrät palossa.



Kuva 6.12.

7 Mekaaniset kuormitukset eurocoden mukaan

Palotilanteen kuormitusyhdistely tehdään seuraavasti (ks. 6.11b, EN1990):

$$\sum_{i \geq 1} G_{k,j} + (\psi_{1,1} \text{ or } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

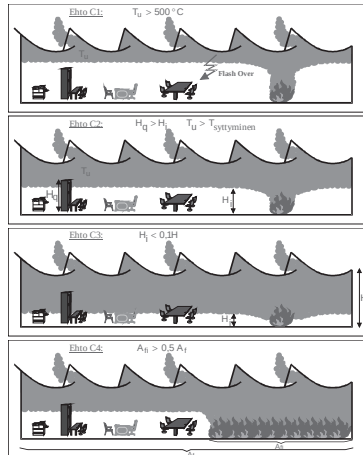
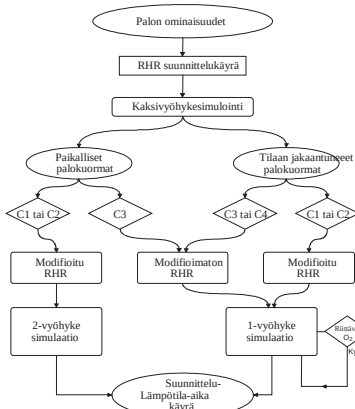
jossa

$G_{k,j}$ pysyvien kuormien ominaisarvo

$Q_{k,1}$ muuttuvan kuorman ominaisarvo

$Q_{k,i}$ muun muuttuvan kuorman ominaisarvo
 $\psi_{1,1}$ muuttuvan kuorman tavallisen arvon yhdistelykerroin

$\psi_{2,i}$ muuttuvan kuorman pitkäaikaisarvon yhdistelykerroin



Kuva 6.14. Yksi- ja kaksivyöhykemallien yhdistely.

Yleisimpiä kuormia koskevat kertoimien ψ_1 ja ψ_2 esitetään EN1990 taulukossa A1.1. Arvot voidaan määritellä kansallisessa liitteessä.

Yksi usein käytetty termi on palomitoituksessa käytettävä kuormitustaso $\eta_{fi,t} = \frac{E_{d,fi}}{E_d}$,

jossa $\eta_{fi,t}$ ja ovat kuorman vaikutusten suunnittelu-arvoja normaali- ja palotilanteessa.

Tämä voidaan kirjoittaa myös muotoon:

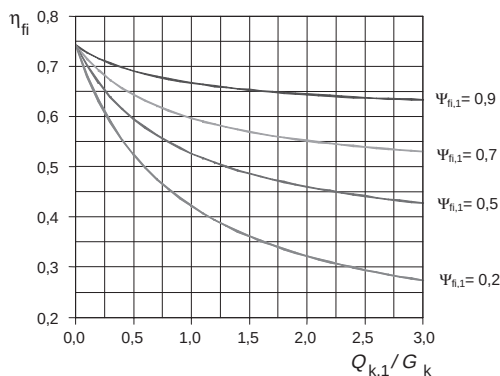
$$\eta_{fi,t} = \frac{G_k + \psi_{fi,t} + Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}}$$

jossa $\gamma_{Q,1}$ on osavarmuusluku muuttuvalle kuormalle 1.

Pienennystekijä η_{fi} riippuu paljon tekijästä $\psi_{1,1}$, joka riippuu rakennustyyppistä. Standardeissa prEN1993-1-2 ja prEN1994-1-2, on esitetty seuraava kuva 7.1 (kuva 4), jossa esitetään pienennystekijä kuormasuhteen $Q_{k,1} / G_k$ funktiona, tekijän $\psi_{1,1}$ eri arvoilla.

Taulukko 7.1. Kertoimien ψ suositusarvot rakennuksille.

Kuorma	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (ks. EN 1991-1.1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,6
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Luokka G: liikennöitävät tilat, $30 \text{ kN} < \text{ajoneuvon paino} \leq 160 \text{ kN}$	0,7	0,5	0,3
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Rakennusten lumikuormat (ks. EN 1991-1.3)			
– Suomi, Islanti, Norja, Ruotsi	0,70	0,50	0,20
– Muut CENin jäsenmaat, kun sijaintikorkeus on $H > 1000$ m merenpinnan yläpuolella	0,70	0,50	0,20
– Muut CENin jäsenmaat, kun sijaintikorkeus on $H \leq 1000$ m merenpinnan yläpuolella	0,50	0,20	0
Rakennusten tuulikuormat (ks. EN 1991-1-1.4)			
	0,6	0,2	0



8 Johtopäätökset

Ylläolevassa artikkelissa on esitetty erilaisia malleja, joilla voidaan laskea palo-osaston lämpötila ajan funktiona. Jotta voidaan arvioida rakenneosien lämpiämistä ajan suhteen, on lasketava myös lämpövuon näihin osiin.

Lämpö siirtyy kuumien kaasujen, liekkien, ympäröivien rakenteiden ja rakenneosien välillä johtumalla ja säteilemällä. Rakenneosan lämpiäminen riippuu sen tyypistä (teräs-, teräs-betoni- tms. rakenne) ja sen palosuojausten laadusta ja määrästä.

Kun tunnetaan rakenteen lämpötilajakauma ja onnettomuustilanteen kuormitusyhdistelmä, rakenteen termomekaaninen käyttäytyminen voidaan arvioida.

VIITTEET

- [1] CEN; EN 1991-1-2, Eurocode 1- Actions on structures, Part 1.2-Actions on structures exposed to fire. CEN Central Secretariat, Brussels, November 2002.
- [2] BSI 96/540493 "The use of Fire Safety Engineering in Buildings" (Draft 27 march 1996)
- [3] Initial Fires: Lund University, Sweden. Institute of Fire Safety Engineering. ISSN 1102-8246. ISRN LUTVDG/TVBB-3070-SE. April 1993.
- [4] ARGOS Theory Manuel (draft 5)-Danish Institute of fire technology - 22/07/92
- [5] Peacock, Jones, Bukowski and Forney. NIST Handbook 146, Volume II - Technical Reference Guide for the Hazard I Fire Hazard Assessment Method - Version 1 - June 1991
- [6] Babrauskas Vytenis: "Burning Rates" Section 3/Chapter 1: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Second Edition - 13th April 1995
- [7] NKB Committee and Works reports 1994:07E: "Performance and Requirements for Fire Safety and Technical Guide for Verification by Calculation"; Nordic Committee on Building Regulations.
- [8] "Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in Large Compartments"; Final report CEC Agreement 7210/ SA210, 317, 517, 618, 832-February 1997.
- [9] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in Closed Car Parks" ECSC Research 7210-SA/211/318/518/620/933; 1993-1996; Final report 1999 - EUR 18867 EN
- [10] CEN; prEN1990, Eurocode - Basis of structural design, 2001.

- [11] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Competitive steel buildings through natural fire safety concept." ECSC Research 7210-SA/125,126,213,214,323,423,522,623,839,937, 1994-98; Final Report 2002 - EUR 20360 EN.
- [12] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Natural fire safety concept -Full scale tests, implementation in the Eurocodes and development of a user-friendly design tool." ECSC Research 7210-060, 1997-2000; Final Report 2003 - EUR 20580 EN..
- [13] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Valorisation project - Natural Fire Safety Concept." ECSC Research 7215-PA/PB/PC-042-057, D-E-F-I-NL-UK & ECCS, 1999-2001.
- [14] DD 0000 The Use of Fire Safety Engineering in Buildings. Draft for Approval for Publication; 27. March 96, Technical Committee FSH / 24. 96/540493.
- [15] Fontana M.: "Required Fire Resistance of Building Elements" - Part A: Fire Load in Buildings, Probability Density Function -, NFSC WG4, Zürich, March 1996
- [16] Background document Eurocode 1 (ENV 1991) Part 1 : Basis of Design, Working Document N° 94 of ECCS, March 1996.
- [17] Hasemi Y. and Tokunaga Tazo: "Flame Geometry Effects on the Buoyant Plumes from Turbulent Diffusion Flames". Fire Science and Technology, Vol.4, N°1, 1984. Ptchelintsev A., Hasemi Y., Nikolaenko M., "Numerical Analysis of Structures exposed to localized Fire", ASIAFLAM's 95, Hong Kong, 1995. Wakamatsu T., Hasemi Y., Yokobayashi Y., Ptchelintsev A.: "Experimental Study on the Heating Mechanism of a Steel Beam under Ceiling exposed to a localized Fire". Hasemi Y., Yokobayashi Y., Wakamatsu T., Ptchelintsev A.: "Fire Safety of Building Components Exposed to a Localized Fire"- Scope and Experiments on Ceiling/Beam System Exposed to a Localized Fire, ASIAFLAM's 95, Hong Kong, 1995.
- [18] Hietaniemi J: " Risk-Based Fire Resistance Requirements" ECSC Research 7210-PR-251, 2000-2003
- [19] Kumar S., Welch S., "Natural Fire Safety Concept - The development of a CFD-Based Engineering methodology for evaluating thermal action on steel and composite structures" 7210-PR184, 1999-2002
- [20] iABSE Colloquium: Basis of Design and Actions on Structures; Background and applications of EC 1; delft 1996
- [21] Evaluation du Risque d'Incendie", Méthode de Calcul, Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes, documentation n° 81, 1984.

- [22] Thomas P.H.: "Design Guide Structural Fire Safety", Workshop CIB W14, February 1995.
- [23] CEN; ENV1991-2-2, Eurocode 1–Basis of design and actions on structures- Part 2-2: Actions on structures- Actions on structures exposed to fire, 1995.
- [24] Cajot L-G, Haller M., et al: "Probabilistic Quantification of a Steel Structure highlighting the potential of steel versus other materials" ECSC Research 7210-PA/PB/PC/PD-249, 2000-2003

Maankäyttö- ja rakennuslaki selityksineen + CD

Lauri Jääskeläinen, Olavi Syrjänen

Kirja sisältää Maankäyttö- ja rakennuslain ensimmäiset merkittävät uudistukset. Näistä tärkein on lain 12a luku Kunnalle yhdyskuntarakentamisesta aiheutuvien kustannusten korvaaminen. Kirjaan on koottu myös suuri määrä KHO:n ja hallinto-oikeuksien päätöksiä. Kätevä CD linkkeineen helpottaa tiedonhakua. Havainnollinen oppikirja ja käytännön käsikirja kaikille kaavoituksen ja rakentamisen osapuolille.



2., täysin uudistettu painos
Rakennustieto Oy, 2003
ISBN 951-682-692-X
824 s., hinta 94 €, sis. alv 8 %

TILAUKSET Rakennustieto Oy
puh. 0207 476 401, fax 0207 476 340
www.rakennustieto.fi

RAKENNUSTIETO