

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Talotekniikan koulutusohjelma

Timo Torkkeli

Savunpoiston laskeminen ja simulointi kauppakeskuksessa

Insinööriyö 05.05.2009

Ohjaaja: insinööri Jarmo Piirainen

Ohjaava opettaja: yliopettaja Olli Jalonen

Tekijä	Timo Torkkeli
Otsikko	Savunpoiston laskeminen ja simulointi kauppakeskuksessa
Koulutusohjelma	talotekniikka
Tutkinto	insinööri (AMK)
Ohjaaja	insinööri Jarmo Piirainen
Ohjaava opettaja	yliopettaja Olli Jalonen
<p>Insinööriyön aiheena oli kaksi pääkohtaa: tutustua savunpoistoon yleisellä tasolla kauppakeskuksessa sekä tutkia savunpoiston laskemista ja palosimulointia. Vertailun tavoitteena oli kahden eri menetelmän tuottamien tuloksien eroista koituvat materiaali- ja laitekustannukset koskien savunpoiston laitteistoa LVI-tekniikan näkökulmasta. Tutustumisessa käytiin läpi savunpoiston yleiset periaatteet ja laitteet. Menetelmistä ensimmäinen oli RIL 232-2008:aan pohjautuva vakiopalotehohon perustuva laskeminen, ja toinen menetelmä oli palosimulointi, jonka teki L2 Paloturvallisuus Oy.</p> <p>Työssä käytettiin laskentaesimerkkinä kauppakeskuksen liiketilaa, jonka pinta-ala oli 1818 m² ja vapaa korkeus 5,11 m. Kyseiseen tilaan laskettiin Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry:n mukainen savunpoiston ilmamäärä seitsenportaisella laskentamenetelmällä. Samaan tilaan simuloitiin tulipaloa vastaava tilanne. Tuloksena saatiin kaksi erisuuruista poistettavaa ilmamäärää, joista vakiopalotehon mukaan laskettu ilmamäärä oli 28,60 m³/s ja palosimuloinnilla saatu vastaava arvo 13,90 m³/s. Tuloksista ilmeni, että savunpoiston ilmamäärä oli 106 % suurempi määräysten mukaan laskettuna kuin tulipaloa simuloimalla.</p> <p>Kustannuksissa savunpoistolaitteisto maksoi vakiopalotehon mukaisilla ilmavirroilla 53 008 € ja palosimuloinnin ilmavirroilla 26 504 €. Simuloimalla saatiin 50 % pienemmät kustannukset savunpoistolaitteistolle. Kustannuksissa huomioitiin puhaltimet, kanavat ja savukaasupellit. Kauppakeskuksien kustannuksissa savunpoiston osuus oli merkittävä. Täten rahallisia säästöjä palveli parhaiten palosimulointi, koska sillä saatiin liiketiloihin lisää arvokasta myyntitilaa ja savunpoistolaitteistojen kokonaiskustannuksia poljettua alas.</p>	
Hakusanat	savunpoisto, simulointi, laskeminen, RIL 232-2008

Author	Timo Torkkeli
Title	Calculation and simulation of exhaust air for a smoke and heat control system in a shopping centre
Number of Pages	67
Date	16 April 2009
Degree Programme	Building Services Engineering
Degree	Bachelor of Engineering
Instructor Supervisor	Jarmo Piirainen, HPAC Engineer Olli Jalonen, Principal Lecturer
<p>This project had two main goals. First, to become acquainted with smoke and heat control systems, and second to study the functional recommendations and calculation methods for smoke and heat exhaust ventilation systems.</p> <p>The Finnish building engineering association (RIL ry) has made guidelines for the fire safety of buildings (RIL 232-2008). The book includes instructions and patterns for calculating the values for certain smoke and heat control systems. In this project the amount of exhaust air was calculated for a store in a shopping centre by following the guidelines step by step. The area of the store was 1818 m² and the height 5.11 m. Another way to find out the stream of air was fire simulation. The simulation was done for the same store by a company called L2 Paloturvallisuus Oy. When the results of the two methods were compared, the differences between them were remarkable. By complying the patterns of the guidelines, the airstream was 28.60 m³/s and the simulation gave with the result of 13.90 m³/s. By following the instructions of the engineering association, the airflow results were 106 % higher compared to the simulation.</p> <p>Costs of the smoke and heat control system were estimated for the both methods. The Machinery expenses were € 53 008 according to the RIL 232-2008 and the outlay for the simulation was € 26 504. The machines contained powered smoke and heat exhaust ventilators, ducts and combustion gas dampers. By simulation the costs were reduced by 50 %. When considering the total costs of the shopping centre building, the smoke and heat control systems have a significant share of them. The fire simulation served the idea of the lowest possible costs better than the RIL 232-2008. The former method also enables a larger area for the store and reduces the whole expenses of the smoke and heat control system.</p>	
Keywords	smoke and heat control system, exhaust air, fire simulation

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

1	Johdanto	6
2	Yleistä savunpoistosta.....	7
2.1	Savunpoiston tavat	8
2.2	Savunpoiston pääperiaatteet.....	9
2.3	Savunpoistolaitteiston valinta	11
3	Savunpoistolaitteisto.....	13
3.1	Savunpoistopuhaltimet.....	13
3.2	Savunpoistokanavat.....	14
3.3	Korvausilma-aukot	15
4	Viranomaisneuvottelut.....	16
4.1	Automaatiotaso.....	17
4.2	Savunpoistoluokka	17
5	Arkkitehtineuvottelut.....	19
5.1	Alustavat kanavareitit.....	19
5.2	Nousuhormien paikat ja koot	19
6	Savunpoiston ilmamäärän laskeminen RIL 232-2008:n pohjalta.....	20
6.1	Laskentaesimerkissä käytetyn tavaratalon esittely	21
6.2	Laskeminen	24
6.2.1	Mitoituspalon määrittäminen savulohkelle	24
6.2.2	Palotehon laskeminen	26
6.2.3	Syntyvän savukaasun massavirran laskeminen	27
6.2.4	Savukaasun lämpötilan laskeminen.....	27
6.2.5	Poistettavan savukaasun massavirta ja savupatjan paksuuden laskeminen ..	29
6.2.6	Savunpoistopinta-alan laskeminen	31
6.2.7	Savunkaasuvirran laskeminen.....	33
6.3	Laskeminen Savunpoisto RIL 232-2008 excel-ohjelmalla	35
7	Laskeminen 2 m:n savuttomalla minimikorkeudella.....	37

8	Palosimulointi	39
8.1	Käytetyt laskentamallit ja ohjelmat	40
8.2	Palon ja savun leviämisen tarkastelu	40
8.3	Palosimuloinnin lähtöarvot ja tehdyt oletukset	41
8.4	Liiketilojen tarkastelussa käytetyt lähtöarvot ja oletukset	41
8.5	Mitoituspalo.....	43
8.6	Skenaariot ja herkkyystarkastelut.....	43
8.7	Poistumisturvallisuuden simulointi	44
8.7.1	Lähtöarvot ja tehdyt oletuksen liiketilojen poistumiseen	45
8.7.2	Liiketilojen poistumistapaukset	46
8.8	Liiketilän poistumislaskelmien yhteenveto	51
8.9	Palosimulointitulosten tarkasteluja.....	53
8.9.1	Savunpoiston ilmamäärän laskeminen liiketilaan.....	56
9	Tulosten vertailu	58
9.1	Ilmamäärät	58
9.2	Kanavakoot ja määrät	58
9.3	Savunpoistopuhaltimet	60
9.4	Korvausilma-aukot	62
10	Hintavertailu.....	63
11	Loppupäätelmä.....	64
	Lähteet.....	66

1 Johdanto

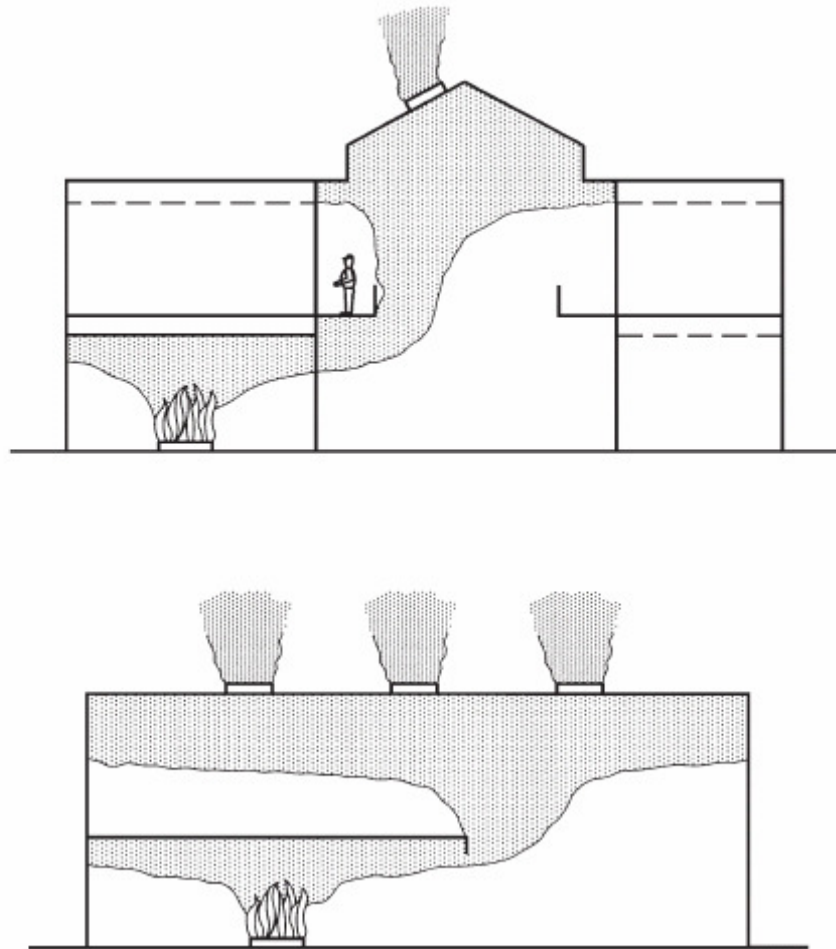
Työn tilaaja on Tuomi Yhtiöt Oy, joka on vuonna 1973 perustettu talotekniikan suunnittelutoimisto. Tällä hetkellä yhtiön vahvuus on 40 ihmistä ja on koko ajan kasvamaan päin. Yrityksen toimialoja ovat LVIA-suunnittelu, sähkösuunnittelu, huoltokirjojen koordinointi ja huoltokirjojen tekeminen ja kiinteistöjen energianlaskutusohjelmistojen suunnittelu ja kehittäminen. Tuomi Yhtiöt Oy:llä on yli 6 000 suunnittelureferenssiä, joiden sekaan mahtuu niin päiväkoteja kuin lentokenttien terminaalirakennuksia. Tällä hetkellä suunnittelukohteisiin kuuluu suuri kauppakeskus Suomessa, jonne yhtiömme laatii suunnitelmat LVI:n ja sähkön osalta. [14.]

Savunpoistolaitteet ovat kauppakeskuksen kaltaisessa rakennuksessa mittavia ja kokonaiskustannuksia ajatellen merkittävä osa rakentamista. Laitteiston mitoittamiseen on kaksi vaihtoehtoa: vakiopalotehoon perustuva laskenta ja palosimulointi. Otan tutkittavakseni koneellisen ja täysin automaattisesti toimivan savunpoiston. Tutkin ja vertaan mitoittamiseen liittyviä laskentamenetelmiä: vakiopalotehoon perustuvia laskelmia ja palosimulointia.

Tulipalon syttyessä syntyy runsaasti savua ja myrkyllisiä palamiskaasuja, jotka vähentävät oleellisesti näkyvyyttä, vaikeuttavat ihmisten pelastautumista ja hankaloittavat palokunnan toimintaa. Savuvirtausten hallinnalla vähennetään palosta aiheutuvia uhkia henkilöturvallisuudelle ja pienennetään omaisuusvahinkoja sekä edesautetaan palokunnan toimintaa. Kauppakeskuksissa savuvirtausten hallinta on tyypillisesti toteutettu puhaltimilla tehostetulla savunpoistolla. Savunpoiston tarkoituksena on poistaa palamiskaasuja hallitusti ja tuoda tilalle raitista ulkoilmaa. Savunpoiston rooli on hyvin tärkeä ihmismassalle tarkoitettussa rakennuksessa, sillä rakennuksessa voi palon syttyessä olla tuhansia ihmisiä, joiden turvallisuus tulee taata varmistamalla turvallinen poistumisreitti tulipalotilanteessa. Ihmisten turvallisuuden lisäksi savunpoistolla turvataan rakennelmia puhaltamalla kuumaa savukaasua ulkoilmaan ja samalla edesautetaan palomiesten työskentelyä. Lisäksi estetään mahdollinen savukaasuräjähdyks ja vähennetään savuvahinkoja. [1, s. 28.]

2 Yleistä savunpoistosta

Ihmisten turvallisuus ja kauppakeskuksen rakenteet ovat ensisijaiset suojelukohteet kun rakennuksessa syttyy tulipalo. Tulipalon syttyessä on tärkeää poistaa savua poistumisreiteiltä, jotta ihmiset näkevät kulkea ja saavat hengitettäväkseen puhdasta ilmaa. Rakenteiden kannalta on kuumuuden poistaminen tärkeää, jotta seinät ja muut kantavat rakenteet pysyvät vahvoina koko palon ajan ja pitävät rakennusta pystyssä. Savunpoiston ideana onkin rajata rakennus savunpoistolohkoihin, joista poistetaan tulipalon syttyessä haitalliset savukaasut ja palosta aiheutuva kuumuus hallitusti, nopeasti ja tehokkaasti. Tilalle tuodaan raitista ulkoilmaa savuttoman kerroksen aikaansaamiseksi lattian yläpuolelle. [1, s. 28–29.]



Kuva 1. Savuttoman kerroksen luominen lattian yläpuolelle [2, s. 15]

2.1 Savunpoiston tavat

Savunpoiston toteuttamiseen on monta tapaa ja ne jaetaan automaatiotasoihin I–III sekä koneelliseen ja painovoimaiseen savunpoistoon. Automaatiotaso III on kaikista parhain ja kehittynein menetelmä hallita savunpoistolaitteita, kuten puhaltimia, korvausilma-aukkoja ja -ikkunoita. Vastaavasti automaatiotaso I on alkeellisin savunpoistomenetelmä, ja sitä ei esiinny kauppakeskuksissa. Kauppakeskuksissa paloviranomaiset katsovat, että automaatiotason tulee olla vähintään tasolla kaksi. Käytännössä savunpoisto toteutetaan tällöin savunpoistopuhaltimilla, koska painovoimaisen savunpoiston ilmamäärä ei riitä poistamaan savua riittävän tehokkaasti.



Kuva 2. Savunpoistopuhallin toiminnassa rakennuksen katolla [3, ajassa 7.58]

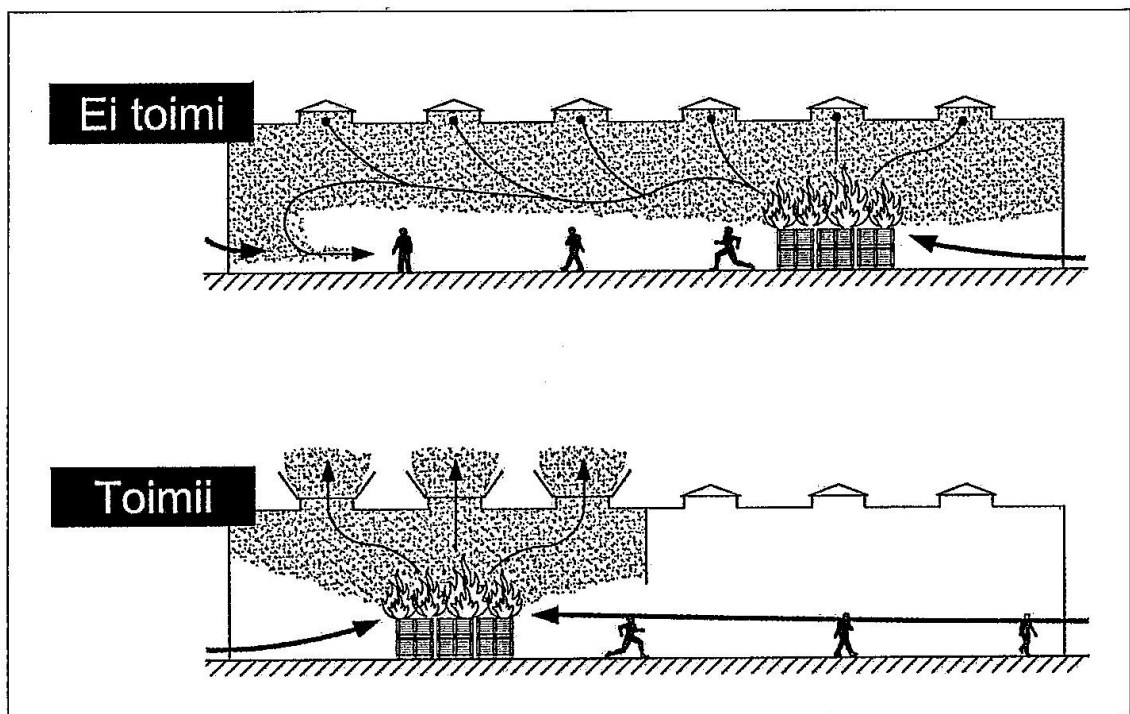
Raittiin ulkoilman roolina on korvata savukaasupuhaltimien poistama ilma rakennuksesta ja on tällöin korvausilmaa. Korvausilma tuodaan korvausilmaikkunoista ja korvausilma-aukoista, jotka sijaitsevat tyypillisesti kauppakeskuksien seinillä. Savuttoman kerroksen ansiosta ihmiset voivat kulkea poistumisreiteillä turvallisesti.

Tehokkaalla ja nopeasti reagoivalla savunpoistolla suojataan rakenteita ja turvataan ihmisten näkyvyys ja hengityskelpoinen ilma poistumisreiteillä sekä helpotetaan palomiesten työskentelyä heidän saavuttuaan palopaikalle.

2.2 Savunpoiston pääperiaatteet

Pääperiaatteet voidaan jakaa karkeasti viiteen osaan [1, s. 38]:

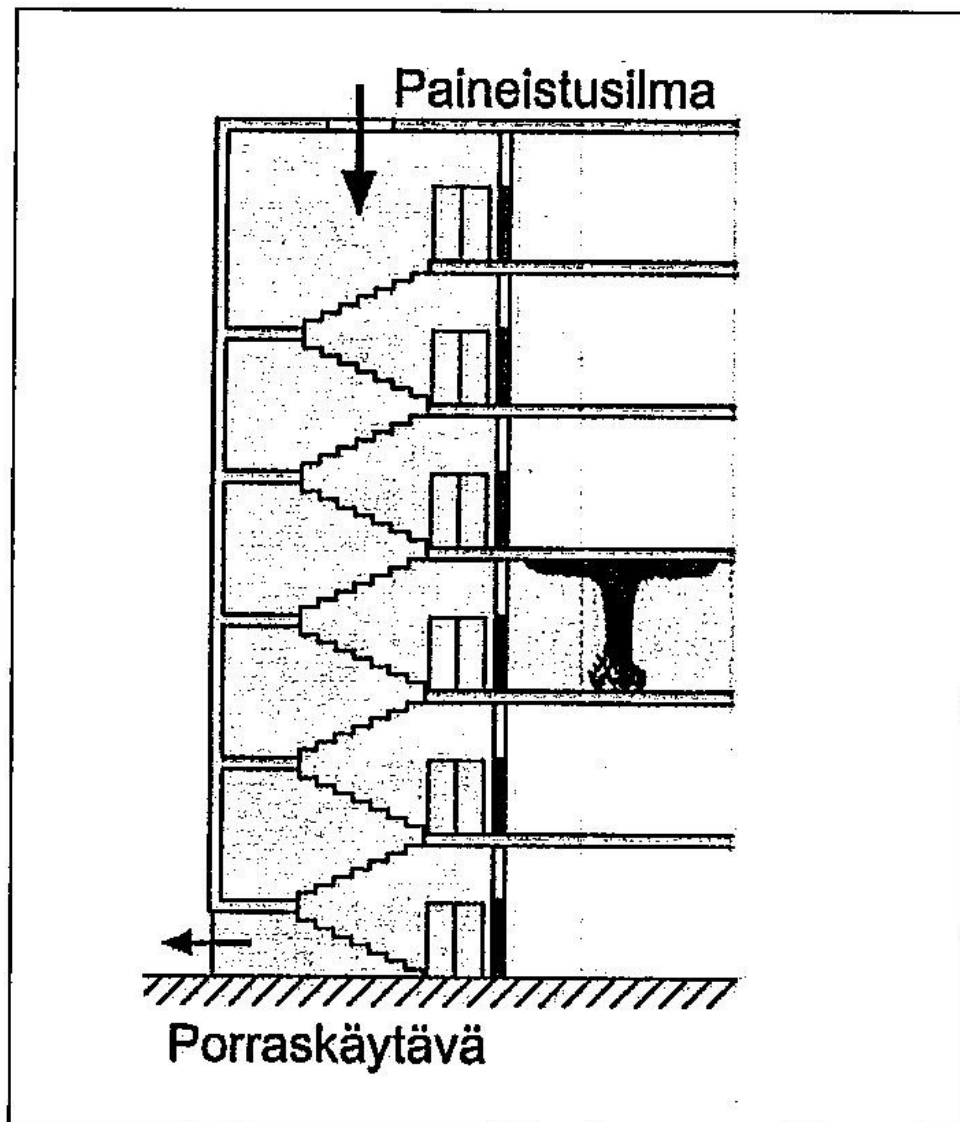
1. Palo-osastoinnilla jaetaan rakennus savutiiviisiin osiin. Tällä estetään savun leviäminen syttymisosastolta laajemmalle alueelle.



Kuva 3. Savusulun merkitys isossa tilassa [1, s. 28]

2. Savu poistetaan huoneen yläosasta savupatjasta joko savunpoistoluukkujen kautta painovoimaisesti tai savunpoistopuhaltimien avulla. Tilalle johdetaan puhdasta korvausilmaa huoneen alaosaan huoneen ensimmäisestä kolmanneksesta. Näin saadaan luotua savuton vyöhyke huoneen alaosaan.

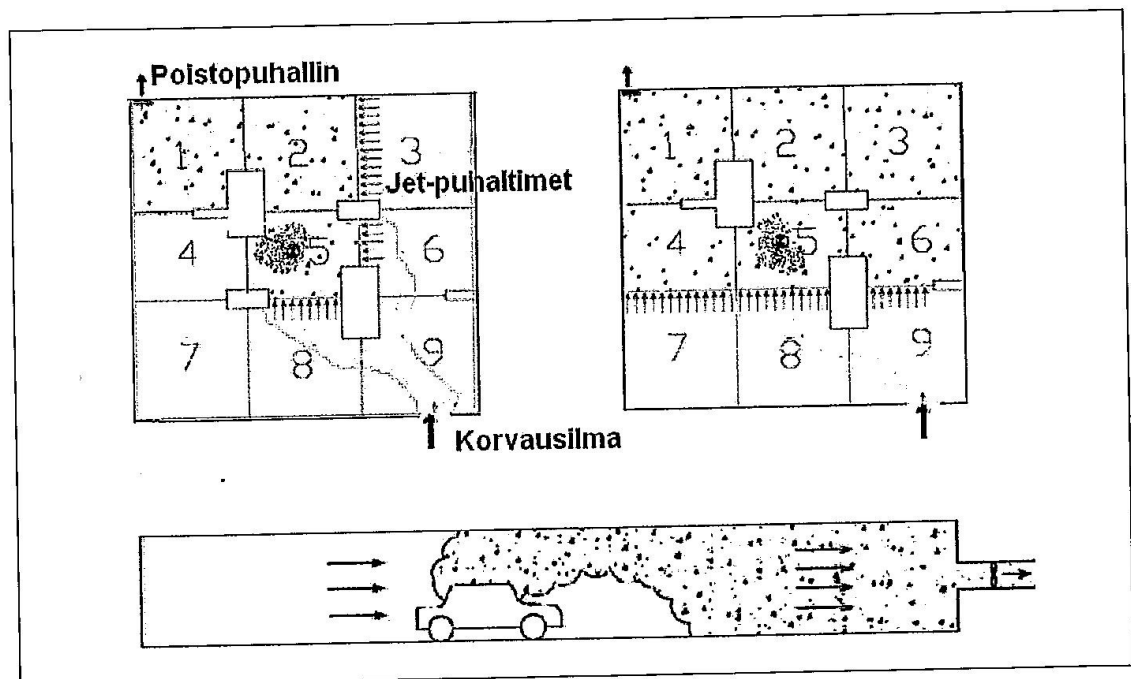
3. Savuton tila saadaan aikaan paineistamalla suojattava tila puhaltimilla. Tila ylipaineistetaan, jolloin palokaasut pakotetaan poistumaan ulkoilmaan. Paineenkevennysaukoilla tai paineen mukaan ohjattavilla puhaltimilla paine ja savuvirtaukset saadaan ohjatuksi suunnitelmien mukaisesti.



Kuva 4. Ylipaineistamalla savu ei pääse porraskäytävään [1, s. 32]

4. Laimentamalla savukaasutiheyttä voidaan saada siedettävät olosuhteet huonetilaan. Riittävällä laimennuksella voidaan esimerkiksi estää herkkiä sähkölaitteita vaurioitumasta. Kauppakeskuksessa tällaisia tiloja ovat esimerkiksi valvomot ja muuntajatilat.

5. Tilaan luodaan suuntapainepuhaltimia käyttäen savuttomia alueita. Ihmiset poistuvat savuttomien alueiden kautta turvallisesti vaarattomalle alueelle. Suuntapainepuhallusta käytetään tunneleissa ja maanalaisissa tiloissa tehokkaaseen ilmanvaihtoon ja savunpoistoon palotilanteessa. Kauppakeskuksessa tällaisia tiloja ovat esimerkiksi parkkihallit.



Kuva 5. Suuntapainepuhallus parkkihallissa [1, s. 43]

2.3 Savunpoistolaitteiston valinta

Savunpoistolaitteiston valinta määräytyy ensisijaisesti tilojen käyttötarkoituksen mukaan. Automaatiotason I ja II savunpoistolaitteita voidaan käyttää sellaisissa tiloissa, joissa palosta aiheutuva riski on riittävän alhaisella tasolla. Tason III mukaisia automaattisia savunpoistolaitteistoja on käytettävä kohteissa, joissa ihmisten turvallinen poistuminen edellyttää poistumisreittien säilymistä savuttomina tai joissa kohteen toiminta vaarantuu kriittiselle tasolle savukaasujen vaikutuksesta. Kauppakeskusten osalta savunpoistolaitteet tulee valita aina tason III mukaan ihmisten turvallisuuden vuoksi.

Isoissa parkkitiloissa ja liikennetunneleissa, jotka tyypillisesti sijaitsevat maan alla kauppakeskuksissa, on savukaasujen ohjaaminen tärkeää. Savukaasuja voidaan ohjata suuntapainepuhaltimilla (jet-puhaltimilla), jotka voivat puhaltaa molempiin suuntiin. Näin saadaan ohjattua savukaasujen virtausta haluttuun suuntaan. Tehokkainta on suunnata puhaltimien virtaus siihen suuntaan, johon savukaasut ovat painovoimaisesti liikkumassa. Iso autopaikoitustila jaetaan enintään 1 000 m²:n vyöhykkeisiin. Puhaltimia ohjataan palotilanteen mukaan. Savuvyöhykkeellä virtausnopeuden tulee olla suurempi kuin savuttoman vyöhykkeen alueella, jotta savuton alue saadaan syntymään. [1, s. 42–44.]



Kuva 6. Suuntapainepuhallin (jet-puhallin) parkkihallissa [5, s. 3]

3 Savunpoistolaitteisto

Savunpoistolaitteisto koostuu monista eri komponenteista. Tärkeitä laitteita toimivan savunpoiston takaamiseksi ovat mm. savunpoistokanavat, korvausilma-aukot ja savunpoistopuhaltimet. Laitteiden toiminnan varmistamiseksi tulee osien täyttää viranomaisten laatimat määräykset palotilanteessa. [1, s. 149–151.]

3.1 Savunpoistopuhaltimet

Koneellisten savunpoistolaitteistojen toiminta perustuu savunpoistopuhaltimiin, joita käytetään savunpoistoon palon alkuvaiheessa ja savutuuletukseen palon sammutuksen jälkeen. Savunpoistopuhaltimille asetetaan tiukat vaatimukset, sillä ne toimivat äärimmäisissä olosuhteissa. Puhallinvalmistajan mukaan Pohjoismaissa ja Baltian maissa ovat paloviranomaiset vaatineet savunpoistopuhaltimilta tiettyä kestävyyttä: runko, moottori ja potkurin lapojen tulee kestää 350 °C:n lämpötilaa yhden tunnin ajan (kuva 7). [7, s. 4.]

KUUSI LÄMPÖTILA-/AIKARYHMÄÄ +150°C ... 600°C

-täyttävät eri maiden ja eri tilanteiden asettamat vaihtelevat vaatimukset.

*Suomessa kuten myös osassa Pohjoismaita ja Baltian maissa vaatimus on +350°C/1 h

LÄMPÖTILA °C	AIKA h	RYHMÄ	KÄYTETTÄVÄT PUHALLINTYYPIT
150	2.0	HT-150/2	JM HT AEROFOIL VAROFOIL
250 300	2.0 0.5	HT-300/0.5	JM HT AEROFOIL VAROFOIL (+)) MAX +250°C
300	1.0	HT-300/1.0	JM HT AEROFOIL
*350	1.0	HT-350 1.0	JM HT AEROFOIL
400	2.0	HT-400/2.0	JM HT AEROFOIL
600	1.5	HT-600/1.5	Koteloitumoottorinen. **(Moottori erotettu savusta kotelolla) Tiedot pyydettyä.

**JTYYPIT 19JBF ... 48JBF, ilmavirta-alue 0.5 ... 25 m³/s.

Kuva 7. Savunpoistopuhaltimien lämpötilakesto [7, s. 4]

Savunpoistopuhaltimien käyttöluokat ovat seuraavat [8, s. 13]:

- eristetty tai eristämätön
- puhallin on savupatjan sisälle soveltuva tai soveltumaton
- yleisilmanvaihtoon ja hätätilanteessa savunpoistoon käytettävä tai vain hätätilanteessa savunpoistoon käytettävä
- kanavoidun jäähdytysilman vaativa.

Standardi SFS-EN 12101-3 ei tunne puhallinvalmistajan ilmoittamaa vaatimusta savunpoistopuhaltimille: runko, moottori ja potkurin lapojen tulee kestää 350 °C:n lämpötilaa yhden tunnin ajan. Standardin mukaan puhaltimet jaetaan lämpötilakohtaisesti kuuteen luokkaan taulukon 1 mukaisesti. F400 luokitettujen tuotteiden luokituksessa tulee näkyä minimitoiminta-aika, esim. F400 (90) tai F400 (120). [8, s. 13–14.]

Taulukko 1. Luokituksen mukainen testauslämpötila ja toiminta-aika [8, s. 14]

Luokka	Lämpötila °C	Minimitoiminta-aika minuutteina
F200	200	120
F300	300	60
F400	400	90 tai 120
F600	600	60
F842	842	30
Ei luokiteltu	tilaajan määrittelemä	tilaajan määrittelemä

3.2 Savunpoistokanavat

Savunpoistokanavien tulee kestää kuumia palokaasuja vähintään yhtä kauan kuin savunpoistopuhaltimet. Kanavien rakennevahvuudesta on Helsingin kaupungin rakennusvirastolla maininta heidän LVI-selostusrungossa kohdassa G3318

Savunpoistokanavat. Kanavien tulee olla ainevahvuudeltaan 1,2 mm:ä ja materiaaliltaan sinkittyä terästä. [9, s. 68.]

3.3 Korvausilma-aukot

Korvausilma-aukoilla tarkoitetaan ovi-, ikkuna- aukkoja tai luukkuja, joista virtaa huonetilaan poistettavaa savukaasun tilavuutta vastaava määrä ympäröivää ilmaa. Savunpoisto alkaa toimia tehokkaasti sen jälkeen, kun korvausilma-aukot ovat auenneet.

Korvausilma-aukkotyyppejä:

- jatkuvasti auki olevat korvausilma-aukot
- korvausilma-aukoiksi suunnitellut luukut
- ovet ja ikkunat
- luonnollisessa savunpoistossa toisen savulohkon savunpoistoluukut
- automaattisesti aukeavat korvausilma-aukot
- korvausilman saanti voidaan varmistaa korvausilmapuhaltimilla

Korvausilma-aukkojen on avauduttava ennen savunpoistopuhaltimien käynnistymistä. Ilmavirtauksen nopeus aukossa saa olla enintään 5 m/s. Korvausilma-aukkojen tulee täyttää suunnitelmien edellyttämät lämpötilaluokat. Korvausilma-aukoille ei vaadita paloluokitustestejä. Korvausilma-aukkojen tulee avautua 60 sekunnissa avausimpulssista ja niiden tulee jäädä auki. [1, s. 149–150.]

4 Viranomaisneuvottelut

Oleellinen osa savunpoistoa on käydä viranomaisneuvottelut hankkeen alkuvaiheessa, jolloin rakennuksen turvallisuustasoon voi vaikuttaa voimakkaimmin.

Viranomaisneuvotteluissa sovitaan savunpoiston yleisistä vaatimuksista, kuten automaatiotasosta ja ilmamäärien laskentamenetelmistä. Neuvotteluissa ovat tyypillisesti paikalla [4]:

- arkkitehti
- LVIS-konsultti/valvoja
- LVI-suunnittelija
- tilaajan tai kiinteistön edustaja
- paloturvallisuussuunnittelija
- rakennusvalvonnan edustaja
- Pelastuslaitoksen edustaja.

Turvallisuustasoon voivat lisäksi vaikuttaa

- rakennuksen käyttäjät
- liikeyritykset
- osakkeenomistajat
- vakuutusyhtiöt
- usean intressitahon edustajat (tilintarkastajat).

4.1 Automaatiotaso

Automaatiotaso kauppakeskuksen tyypisessä hankkeessa on III, koska kyseessä on henkilöturvallisuuden kannalta kriittinen kohde. Tällöin savunpoisto toteutetaan vakiopalotehooon perustuvalla mitoituksella tai mahdollisesti palon kehitystä simuloivalla menetelmällä. Menetelmän perusidea on toteuttaa savunpoisto niin tehokkaasti, että ihmisten poistuminen savulohkolta on riittävän turvallista. [1, s. 70]

4.2 Savunpoistoluokka

Savunpoistoluokkaan eivät viranomaiset juurikaan vaikuta, sillä luokan määrittämiseen on laadittu RIL 232-2008:ssa yksiselitteiset taulukot rakennuksien käyttötarkoitusten mukaan (taulukko 2). Kohteen käyttötarkoituksen perusteella valittiin savunpoistoluokaksi luokka 3, sillä rakennus luokiteltiin suurmyymäläksi tai vastaavasti tavarataloksi. RIL 232-2008:n mukaan savunpoistoluokkaa käytetään mitoittavana perustana yhdessä automaatiotason kanssa. Näillä tiedoilla saadaan laskettua vakiopalotehooon perustuva ilmamäärä savunpoistolohkoille. [1, s. 59.]

Taulukko 2. Savunpoistoluokkaan 3 kuuluvat tilatyypit [1, s. 59]

Tuotantotila	Varasto	Muu kohde
Savunpoistoluokka 3 (SL 3)	Varastointikorkeus enintään 6 m	
Alkoholitehtaat Autohuoltamot ja korjaamot Elektroniikkatehtaat Hamppu-, juutti- ja pellavatehtaat Harjatehtaat Hiili- ja öljyvoimalat Höyläämöt Kaapecti- ja kuljetintunnelit Kartonkitehtaat Kehraämöt Keksi- ja leipätehtaat Kenkätehtaat Kirjapainot Kumituotetehtaat ja -korjaamot Kutomot Kylmäkalustetehtaat (vaah- muovieristeitä käyttävät) Lastulevytehtaat Leipomot Maalaamot (syttyvät nesteet) Mattotehtaat (vaahtomuovia ja kumia käyttävät SL 4) Muovituotetehtaat (Vaahtomu- vitehtaat SL 4) Muuntamot Myilyt Pakkaamot (palavia pakk.tarvikk SL 4) Panimot (mallasjuomat) Paperitehtaat ja paperijalostu- stehtaat (konesalit ja viimeistelyosastot) Puristemuovitehtaat Puusepäntehtaat Puutalotehtaat Puuvillakehraämöt Rehutehtaat Sahat	<u>Varastointikorkeus < 4 m</u> Asetyleenipullovarastot Asfalttipaperirullat (pysty- suorassa) Bitumilla tai vahalla pääl- lystetty paperi Kaikki vaahtomuovi- pakkaukset Kuivarehuvarastot Kumituotteet (vaahtokumi SL 4) Lastuvillapaalit Mekaanisen puuteollisuus- tuotevarastot Nestekaasuvarastot Palavat nesteet lasi- ja muovialustoissa Puiset kuormalavat ja kuormalavalaatikot Rimoitettu puutavara Selluloidi Selluloosa- ja paperirullat (pystyssä) Viljavarastot Öljyvarastot <u>Varastointikorkeus 4-6 m</u> Asfalttipaperirullat (vaakasuorassa) Huonekalut Jätepaperipaalit Korkkipaalit Lastulevy Linoleum Matot (vaahtomuovi- ja kumipohjaiset)	Autosuojat (kuor- ma- ja linja-autot) Autohallit (kuorma- ja linja-autot) Elokuvateatterit Filmiateljeet Hoitolaitokset Jätehuoneet Kokoontumis- huoneistot Konserttitalit Lastauslaituri Näyttämöt Paikoitushallit Suurmyymälät Sähköpääkeskus Tavaratalot Teatterit TV-studiot Vankilat (suljetut osastot)

5 Arkkitehtineuvottelut

Arkkitehtineuvottelut käydään hankkeen alussa esiselvittelyvaiheessa koskien savunpoistokanavien nousuhormeja ja muita tilantarpeita. Neuvottelut ovat tärkeä tehdä varhaisessa vaiheessa, jotta kanavia varten osataan varata tarpeeksi isot kuilut ja tilantarpeet. Sovitut tilantarpeet ja kuiluvaraukset toimivat kanaviston suunnittelun lähtökohtana ja sen vuoksi alussa tulee arvioida mahdollisimman tarkasti paloalueiden ilmamäärät.

5.1 Alustavat kanavareitit

Alustavat kanavareitit sovittiin arkkitehdin kanssa kulkevan liiketilojen katossa. Alas lasketun katon yläpuolella sovittiin olevan tilaa 1200 mm pystysuunnassa. Tuossa tilassa tulisi kulkea myös muut talotekniikan putkistot ja sähköarinat. Haasteellisinta on saada kaikki tekniikka sopimaan 1200 mm:n tilaan ja varsinkin tekniikan yhteensovittaminen kuilujen ja nousuhormien läheisyydessä. Kaikki mahdollinen risteily tulee välttää kanavien ja suurimpien putkien kohdalla. Vaakasuuntaiset siirrot kuiluista liiketiloihin sovittiin tehtävän lyhyillä kanavilla. [4]

5.2 Nousuhormien paikat ja koot

Nousuhormien paikat ehdotettiin paloturvallisuussuunnittelijan johdosta savunpoiston kannalta hyvälle paikalle. Hormit keskitettiin liiketilan savulohkon keskeiselle paikalle, jotta olisi välttytty vaakasuunnassa kulkevilta savunpoistokanavilta. Tarkoituksena oli, että hormin kylkeen olisi tullut savunpoistoluukku, josta savu olisi imeetty suoraan hormiin. Arkkitehdin toiveita kuitenkin kuunneltiin ja hänen toivomuksestaan hormit siirrettiin porraskäytävien kylkeen. Porraskäytävät toimivat liiketilojen poistumisteinä palon syttyessä, ja sen takia savunpoistoon suunniteltiin vaakasuuntainen kanavasiirto hormista liiketilan keskustaan. Näin tehtiin siksi, että savua ei voida imeä poistumistien läheisyyteen. [4]

6 Savunpoiston ilmamäärän laskeminen RIL 232-2008:n pohjalta

Laskentamenetelmäksi valittiin tavaratalolle sopiva mitoitusmenetelmä, jolla saatiin yksinkertaisesti mitoitettua savunpoistolaitteisto. Tavaratalon osalta käytettiin vakiopalotehoon perustuvaa mitoitusta. Mitoitusmenetelmä soveltuu henkilöturvallisuuden kannalta kriittisiin kohteisiin.

Mitoitusmenetelmässä käytettiin vakiopalotehoa, joka saatiin palon pinta-alan ja palon tiheyden perusteella. Savunmuodostus laskettiin mitoituspaloon perustuen käyttäen mitoituspalon piiriä ja savuttoman vyöhykkeen korkeutta. Savunpoistopuhaltimien määrä ja ilmavirta mitoitettiin siten, että tavarataloon jäi riittävän korkea savuton vyöhyke ja savupatjan lämpötila pysyi riittävän alhaisena.

Menetelmän perusideana on, että palon kehittymiseen (mitoitustilannetta vastaavaksi) kuluva aika riittää turvalliseen poistumiseen ja palokunnan pelastus- ja sammutustyön aloittamiseen. Mitoituspalo määritettiin riittävän suureksi, jotta savunpoiston tehokkuus on varmasti tarpeeksi riittävä. Tavaratalossa olevilla ihmisillä on tällöin tarpeeksi aikaa poistua paloalueelta.

Vakiopalotehoon perustuvan laskentamenetelmän vahvuudet ja heikkoudet ovat seuraavat:

- + Yksinkertainen ja helppo verrattuna palon simulointiin
- Käytettävissä olevaa poistumisaikaa ei voida laskea

Vakiopalotehoon perustuvalla laskentamenetelmällä ei voida laskea käytettävissä olevaa poistumisaikaa. Ajan laskemiseen tarvitaan palon kehitystä ennustavaa simuloivaa menetelmää, jota tekevät Suomessa tiettävästi kaksi yritystä.

Mitoitusmenetelmän keskeinen tekijä on savulohkon pinta-ala. Liian suuren savulohkon riskejä ovat, että reuna-alueiden savu jäähtyy, painuu alas ja estää lopulta poistumisen. Jäähtyneessä savukerroksessa nosteen vaikutus heikkenee ja virtaus savunpoistoaukoista hidastuu. [1, s. 69 ja 70]

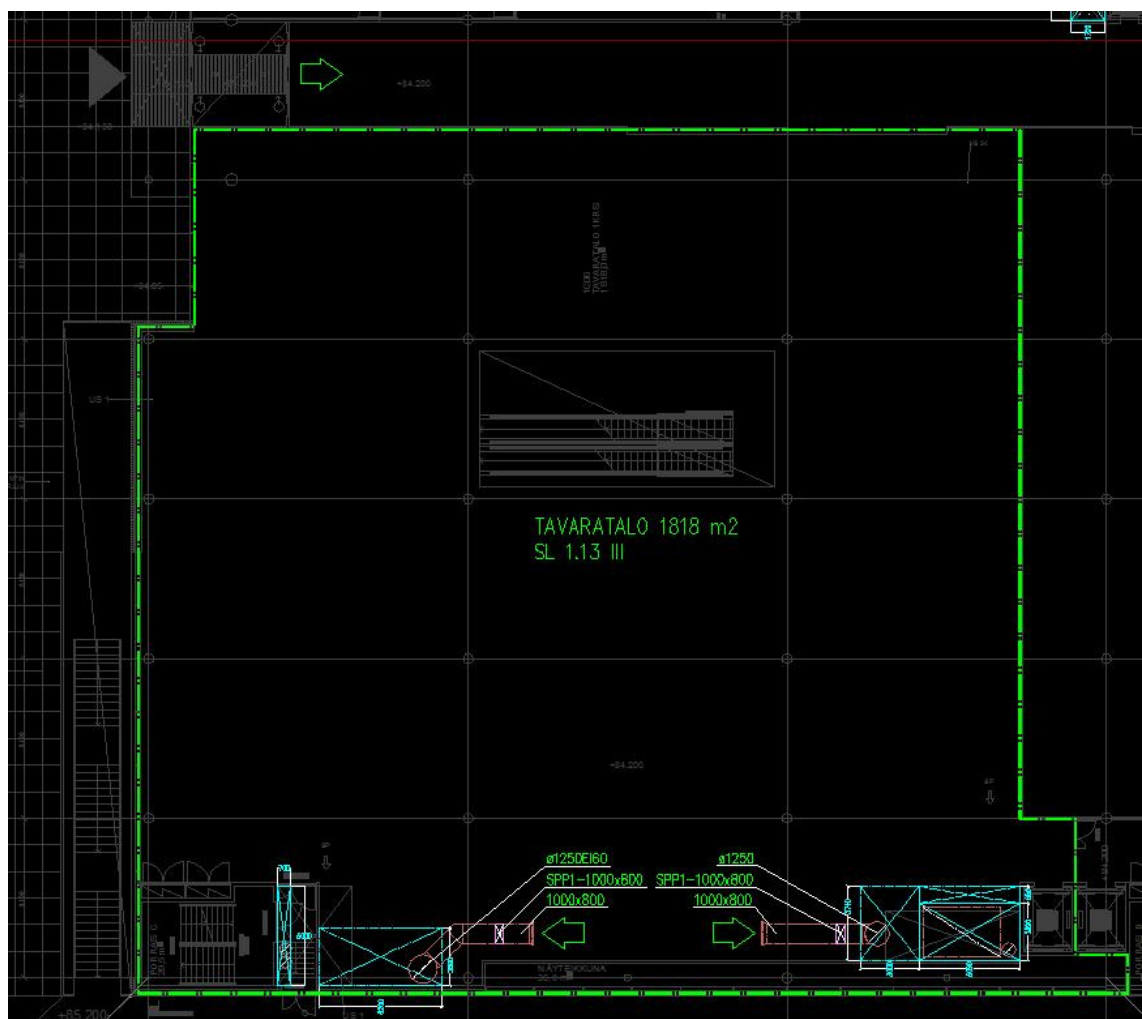
6.1 Laskentaesimerkissä käytetyn tavaratalon esittely

Savunpoiston ilmamäärien laskemisessa käytettiin esimerkkisavunpoistolohkona ensimmäisen kerroksen tavarataloa (1 818 m²). Ilmamäärien ja muiden tarpeellisten tietojen laskeminen perustettiin RIL 232-2008:aan pohjautuen.

Tavaratalon lähtötiedot:

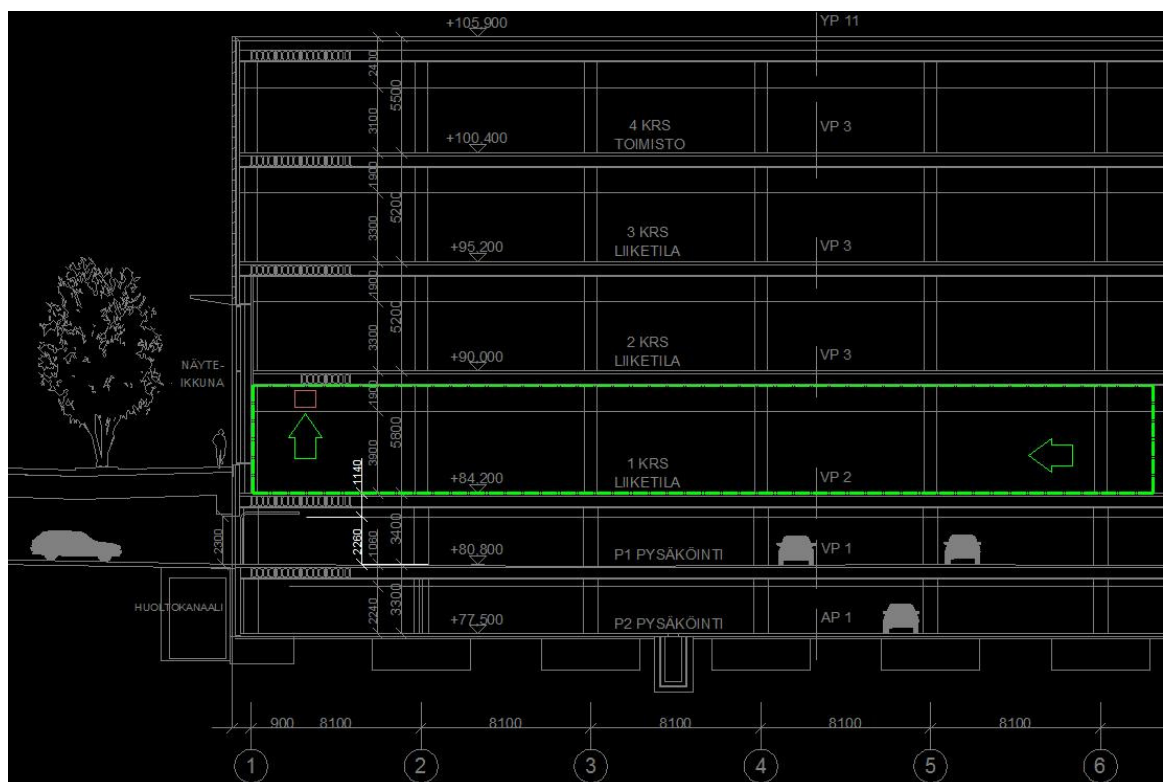
- Pinta-ala 1818 m² (=savunpoistolohko)
- Automaatitaso III
- Palokuormaryhmä < 600 MJ/m² (automaattinen sammutuslaitteisto)
- Vapaa huonekorkeus 5,11 m
- Savuton minimikorkeus (Z) 3,00 m (ks. kuva 1)
- Savupatjan lämpötila saa henkilöturvallisuuden takia olla enintään 200 °C
- Savunpoistolohkon piiri on 188,3 m
- Sprinkleri.

Kuvassa 8 on esitetty laskentaesimerkissä käytetyn tavaratalon pohjakuva. Tavaratalon savunpoisto toteutettiin koneellisella savunpoistolla kahdesta pisteestä. Tavaratalon seinät rajattiin vihreällä pistekatkoviivalla. Ruskealla piirretyt viivat esittävät savunpoistokanavia. Savunpoistopellit piirrettiin sulkupeltimerkein ja niissä merkintä mittatekstein. Koneellisen savunpoiston suunnitellut pisteet esitettiin vihreillä nuolilla ja mittateksteillä. Kuvan alareunassa esitettiin imupisteiden paikat ja kuvan yläreunassa korvausilman reitti tavarataloon.



Kuva 8. Mitoitettavan tavaratalon pohjakuva

Kuvassa 9 on esitetty laskentaesimerkissä käytetyn tavaratalon leikkauskuva. Tavaratalon seinät rajattiin vihreällä pistekatkoviivalla aivan kuin pohjakuvassa. Tilan korkeus on 5 110 mm tason +84.200 ontelolaatan pintavalusta seuraavan kerroksen ontelolaatan pohjaan. Savunpoiston imupiste piirrettiin katonrajaan ruskealla suorakaiteella ja savunpoiston ilmavirtausten suunnat esitettiin virheillä nuolilla. Savunpoiston imupisteet ovat kuvan vasemmassa laidassa ja korvausilman tuloreitti kuvan oikeassa laidassa.



Kuva 9. Mitoitettavan tavaratalon leikkauskuva

6.2 Laskeminen

Laskeminen eteni vaihe vaiheelta seitsemässä portaassa:

1. Mitoituspalon määrittäminen savulohkelle
2. Palotehon laskeminen
3. Syntyvän savukaasun massavirran laskeminen
4. Savukaasun lämpötilan laskeminen
5. Poistettavan savukaasun massavirran ja savupatjan paksuuden laskeminen
6. Savunpoistopinta-alan laskeminen
7. Savukaasuvirran laskeminen.

6.2.1 Mitoituspalon määrittäminen savulohkelle

Mitoituspalon pinta-ala ja piiri sekä palavan materiaalin perusteella arvioitava palon tiheys määritetään mahdollisimman tarkasti ottaen huomioon rakennuksen elinkaari. Mitoituspaloon vaikuttavia tekijöitä ovat palon pinta-ala (A_f), palon piiri (p_f) ja palon tiheys (q_f). Mitoituspalon alueen määrittämisessä otetaan huomioon palon leviämistä rajoittavat esteet kuten käytävät sekä palon leviämisen laajuus ennen palokunnan saapumista paikalle. Jos näitä tietoja ei ole käytettävissä, käytetään taulukoissa 3 ja 4 esiintyviä arvoja. Taulukkoa 3 tulkittiin savunpoistoluokan 1 mukaan, koska liiketila on varustettu automaattisella sammutuslaitteistolla. Taulukkoa 4 tulkittiin sprinklatun suojaustason mukaan. [1, s. 73.]

Taulukko 3. Mitoituspalon pinta-ala, piiri ja tiheys [1, s. 72]

Savunpoistoluokka	Pinta-ala, A_f (m ²)	Piiri, p_f (m)
1	9	10
2	25	20
3	40	25
4	90	40

Jos kohde on varustettu automaattisella sammutuslaitteistolla, käytetään luokan 1 arvoja.
 Jos kohde on varustettu paloilmotimella, joka on kytketty hätäkeskukseen ja joka antaa palovaroituksen esim. kovaäänisellä, ja jos palokunnan toimintavalmiusaika on enintään 5 minuuttia, savunpoistoluokissa 3 ja 4 saa käyttää luokan 2 arvoja.

Taulukko 4. Palon tiheys (q_f) savunpoistoluokan ja suojaustason mukaan [1, s. 73]

Kohteen suojaustaso	Minimiarvo (kW/m ²)	Maksimiarvo (kW/m ²)
Sprinklattu	250	650
Sprinkklaamaton; varastointikorkeus enintään 2 m	250	1 250
Sprinkklaamaton varastointikorkeus yli 2 m	$250 * (h_f - 1)$	$1 250 * (h_f - 1)$

*) Näitä arvoja ei kuitenkaan sovelleta korkeavarastoihin.

Taulukoista 3 ja 4 saadut arvot:

- A_f on 9 m²
- p_f on 10 m
- q_f on minimiarvo 250 kW/ m² ja maksimiarvo 650 kW/ m²

Arvot ovat tärkeitä palotehon laskemisessa seuraavassa vaiheessa, sillä palotehon avulla saamme arvioitua savun käyttäytymisen savulohkolla. Palotehon kasvaessa savun lämpötila nousee ja sen myötä savusta tulee kevyempää kuin savulohkoa ympäröivä ilma. Vaikutus on havaittavissa savun nousuna katon rajaan. Palotehon pienentyessä savun ominaispaine kasvaa ja noste ei ole niin voimakasta. Tästä syystä savunpoistolaskelmat tehtiin palontiheiden ala- ja ylärajoille. [1, s. 73]

6.2.2 Palotehon laskeminen

Palotehon ala- ja yläraja saatiin laskemalla kaavasta 1. Paloteho Q_c ilmoitetaan yksikössä kW. Palotehon laskemiseen tarvittiin edellisessä kohdassa saaduista arvoista palon tiheyksiä (q_f) ja palon pinta-alaa (A_f). [1, s. 74.]

$$Q_c = \chi \cdot q_f \cdot A_f \quad (1)$$

Q_c on paloteho [kW]

χ on huomioi säteilylämpöhäviöt ja epätäydellisen palamisen (arvo on yleensä 0,7)

q_f on palon tiheys [kW/m²]

A_f on palon pinta-ala [m²]

$$Q_{c\text{ ala}} = 0,7 \cdot 250 \text{ kW / m}^2 \cdot 9 \text{ m}^2 = 1575 \text{ kW} \quad (1)$$

$$Q_{c\text{ ylä}} = 0,7 \cdot 650 \text{ kW / m}^2 \cdot 9 \text{ m}^2 = 4095 \text{ kW} \quad (1)$$

χ on huomioi säteilylämpöhäviöt ja epätäydellisen palamisen (arvo on yleensä 0,7)

q_f on 250...650 kW/m²

A_f on 9,0 m²

Savulohkon mitoittavan palotehon alarajaksi saatiin 1575 kW ja ylärajaksi 4095 kW.

6.2.3 Syntyvän savukaasun massavirran laskeminen

Syntyvän savukaasun massavirta (m_p) laskettiin savuttoman korkeuden ja mitoituspalon piirin avulla. Palopatsas nousee suoraan kattoon ja savukaasut leviävät savulohkon alueelle ja ne poistetaan katossa olevista savunpoiston imupisteistä. [1, s. 74.]

Laskentaesimerkin tapauksessa käytettiin kaavaa 2.

$$m_p = 0,19 \cdot p_f \cdot Z^{3/2} \quad (2)$$

m_p on syntyvän savukaasun massavirta [kg/s]

p_f on palon piiri [m]

Z on savuton korkeus [m]

$$m_p = 0,19 \cdot 10 \text{ m} \cdot 3 \text{ m}^{3/2} = 9,87 \text{ kg / s} \quad (2)$$

p_f on 10 m

Z on 3 m

Syntyvän savukaasun massavirraksi saatiin 9,87 kg/s.

6.2.4 Savukaasun lämpötilan laskeminen

Savukaasun lämpötilasta käytetään kahta nimitystä: savukaasun lämpötila ja savupatjan lämpötila. Savusta muodostuu palamisen edetessä patja, jonka lämpötila voi nousta hyvinkin korkeaksi. Haluttaessa savukaasun lämpötilan pysyvän tietyissä rajoissa, tulee savua poistaa tietyllä massavirralla. Savupatjan lämpötilan ala- ja yläraja laskettiin kaavoilla 3 ja 4. [1, s. 74–75.]

$$\theta = \frac{Q_c}{m_p \cdot c} \quad (3)$$

θ on savupatjan lämpötilannousu [K]

Q_c on mitoittava paloteho [W]

m_p on syntyvän savukaasun massavirta [kg/s]

c on ominaislämpökapasiteetti [$c = 1040 \text{ J/kgK}$]

$$\theta = \frac{1575000 \dots 4095000 \text{ W}}{9,87 \text{ kg / s} \cdot 1040 \text{ J / kgK}} = 153,4 \dots 398,9 \text{ K} \quad (3)$$

Q_c on 1575000...4095000 W

m_p on 9,87 kg/s

c on 1040 J/kgK

Savupatjan lämpötilannousuksi saatiin laskemalla 153,4...398,9 K. Savupatjan lämpötilan ylärajana käytettiin kuitenkin arvoa 185 K, koska savupatjan lämpötila saa olla korkeintaan 200 °C (=200 °C – 15 °C).

Savupatjan lämpötilannousua hyödyksi käyttäen saatiin kaavalla 4 laskettua savupatjan lämpötila. Savupatjan lämpötila saatiin summaamalla liiketilassa ympäröivän ilman lämpötila ja savupatjan lämpötilannousu.

$$T_s = T_0 + \theta \quad (4)$$

T_s on savupatjan lämpötila [K]

θ on savupatjan lämpötilannousu [K]

T_0 on ympäröivän ilman lämpötila [K]

$$T_s = 288,15 \text{ K} + 153,4\dots185\text{K} = 441,55\dots473,15\text{K} \quad (4)$$

θ on 153,4...185 K

T_0 on 288,15 K

Savupatjan lämpötilaksi saatiin 441,55...473,15 K (= 168,4...200 °C).

6.2.5 Poistettavan savukaasun massavirta ja savupatjan paksuuden laskeminen

Tasapainotilanteessa poistettavan savukaasun massavirta on yhtä suuri kuin syntyvän savukaasun massavirta. Jos laskettu savupatjan lämpötila (T_s) on pienempi kuin savupatjan kriittinen lämpötila (T_{kr}), niin poistettavan savukaasun massavirta (m_v) on sama kuin savutonta minimikorkeutta vastaavan syntyvän savukaasun massavirta (m_p). Savupatjan kriittinen lämpötila on henkilöturvallisuuden takaamiseksi 200 °C. [1, s. 75.]

$$m_v = m_p \quad (5)$$

m_v on poistettavan savukaasun massavirta [kg/s]

m_p on syntyvän savukaasun massavirta [kg/s]

Alaraja-arvolla savupatjan lämpötila 168,4 °C alitti kriittisen lämpötilan 200 °C, joten poistettavan savukaasun massavirran alaraja saatiin kaavalla 5.

$$m_v = 9,87 \text{ kg / s} \quad (5)$$

m_p on 9,87 kg/s

Jos laskettu savupatjan lämpötila (T_s) on suurempi kuin savupatjan kriittinen lämpötila (T_{kr}), poistettavan savukaasun massavirta (m_v) lasketaan kaavalla 6. **Kaavassa käytetään lämpötilannousuna arvoa ($T_{kr} - T_0$).** [1, s. 75]

$$m_v = \frac{Q_c}{\theta \cdot c} = \frac{Q_c}{(T_{kr} - T_0) \cdot c} \quad (6)$$

m_v on poistettavan savukaasun massavirta [kg/s]

Q_c on mitoittava paloteho [W]

θ on savupatjan lämpötilannousu ($T_{kr} - T_0$) [K]

c on ominaislämpökapasiteetti [$c = 1040 \text{ J/kgK}$]

Savupatjan lämpötilaksi laskettiin 376 °C (= 649,15 K), joten savupatjan kriittinen lämpötila ylitettiin ja poistettavan savukaasun massavirran laskemiseen käytettiin kaavaa 6. Savupatjan lämpötilana käytettiin arvoa 473,15 K. [1, s. 75]

$$m_v = \frac{4095000 \text{ W}}{(473,15 \text{ K} - 288,15 \text{ K}) \cdot 1040 \text{ J / kgK}} = 21,3 \text{ kg / s} \quad (6)$$

Q_c on 4095000 W

θ on 473,15 K – 288,15 K

c on 1040 J/kgK

Poistettavan savukaasun massavirraksi saatiin 21,3 kg/s.

6.2.6 Savunpoistopinta-alan laskeminen

Savulohkon savunpoistoluukkujen yhteenlaskettu tehollinen savunpoistopinta-ala ($A_v C_v$) laskettiin kaavalla 7 [1, s. 75].

$$A_v C_v = \frac{\alpha \cdot m_v}{\rho_0} \sqrt{\frac{T_s^2 + (A_v C_v / A_i C_i)^2 \cdot T_s \cdot T_0}{2 \cdot g \cdot d \cdot \theta \cdot T_0}} \quad (7)$$

$A_v C_v$ on savunpoistopinta-ala [m^2]

A_v on savunpoistoaukon geometrinen pinta-ala [m^2]

C_v on savunpoistoaukon virtauskerroin [-]

α on savulohkon pinta-alasta riippuva kerroin [-]

m_v on poistettavan savukaasun massavirta [kg/s]

ρ_0 on ilman tiheys [kg/m^3], (1,225, kun $T_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$)

T_s on savupatjan lämpötila [K]

A_i on korvausilma-aukon geometrinen pinta-ala [m^2]

C_i on korvausilma-aukon virtauskerroin [-]

T_0 on ympäröivän ilman lämpötila [K]

g on maan vetovoiman kiihtyvyys [$9,81 \text{ m/s}^2$]

d on savukerroksen paksuus [m]

θ on savupatjan lämpötilannousu [K]

Mitoituskaavaa 7 yksinkertaistetaan antamalla suhteelle $A_v C_v / A_i C_i$ arvo 1.

$$A_v C_v = \frac{\alpha \cdot m_v}{\rho_0} \sqrt{\frac{T_s^2 + T_s \cdot T_0}{2 \cdot g \cdot d \cdot \theta \cdot T_0}} \quad (8)$$

Kerroin α ottaa huomioon savulohkon pinta-alan (A_s) ja sen arvo saatiin kaavasta 10. Esimerkkilaskun liiketilan pinta-ala on $1\,818 \text{ m}^2$, jonka puolesta lasku tuli suorittaa kaavalla 9. [1, s. 76.]

$$\alpha = \frac{A_s}{1600} \quad \text{kun } A_s > 1600 \text{ m}^2 \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{1818}{1600} = 1,14 \quad (9)$$

A_s on 1818 m²

Savulohkon pinta-alasta riippuva kerroin on 1,14.

Savunpoistopinta-ala laskettiin kaavalla 8.

$$A_v C_v = \frac{1,14 \cdot 9,87 \text{ kg/s}}{1,225 \text{ kg/m}^3} \sqrt{\frac{(441,55 \text{ K})^2 + 441,55 \text{ K} \cdot 288,15 \text{ K}}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 2,11 \text{ m} \cdot 153,4 \text{ K} \cdot 288,15 \text{ K}}} = 3,85 \text{ m}^2 \quad (8)$$

$$A_v C_v = \frac{1,14 \cdot 21,3 \text{ kg/s}}{1,225 \text{ kg/m}^3} \sqrt{\frac{(473,15 \text{ K})^2 + 473,15 \text{ K} \cdot 288,15 \text{ K}}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 2,11 \text{ m} \cdot 185,0 \text{ K} \cdot 288,15 \text{ K}}} = 8,00 \text{ m}^2 \quad (8)$$

α on 1,14

m_v on 21,3 kg/s

ρ_0 on 1,225 kg/m³

T_s on 441,55...473,15 K

T_0 on 288,15 K

g on 9,81 m/s²

d on 2,11 m

θ on 153,4...185,0 K

Savunpoistopinta-alaksi laskettiin 3,85...8,00 m².

6.2.7 Savunkaasuvirran laskeminen

Koneellisen savunpoiston tapauksessa savulohkosta poistettavan savukaasun tilavuusvirta (V_v) lasketaan kaavalla 11 [1, s. 77].

$$V_v = \frac{\alpha \cdot m_v \cdot T_s}{\rho_0 \cdot T_0} \quad (11)$$

V_v on savukaasun tilavuusvirta [m^3/s]

m_v on poistettavan savukaasun massavirta [kg/s]

α on savulohkon pinta-alasta riippuva kerroin [-]

T_s on savupatjan lämpötila [K]

ρ_0 on ilman tiheys [kg/m^3], (1,225, kun $T_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$)

T_0 on ympäröivän ilman lämpötila [K]

Liiketila on yhtä isoa savulohkoa, jonka pinta-ala on $1\,818 \text{ m}^2$. Pinta-alasta riippuvan kertoimen α määrittämiseksi käytettiin kaavaa 12. [1, s. 77]

$$\alpha = 1 \quad \text{kun } 1000 \text{ m}^2 < A_s < 2000 \text{ m}^2 \quad (12)$$

α on savulohkon pinta-alasta riippuva kerroin [-]

A_s on savulohkon pinta-ala [m^2]

Laskettiin savulohkon pinta-alasta riippuva kerroin.

$$\alpha = 1 \quad (12)$$

A_s on 1818 m^2

Savulohkon pinta-alasta riippuvaksi kertoimeksi laskettiin 1,0.

Kertoimen avulla edettiin laskemaan savukaasuvirtaa ala- ja ylärajalle.

$$V_{\text{vala}} = \frac{1,0 \cdot 9,87 \text{ kg / s} \cdot 441,55 \text{ K}}{1,225 \text{ kg / m}^3 \cdot 288,15 \text{ K}} = 12,3 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (11)$$

$$V_{\text{vylä}} = \frac{1,0 \cdot 21,3 \text{ kg / s} \cdot 473,15 \text{ K}}{1,225 \text{ kg / m}^3 \cdot 288,15 \text{ K}} = 28,6 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (11)$$

m_v on 9,87...21,3 kg/s

α on 1,0

T_s on 447,6...473,15 K

ρ_0 on 1,225 kg/m³

T_0 on 288,15 K

Savukaasuvirraksi laskettiin 12,3...28,6 m³/s. Mitoittavana ilmavirtana käytettiin maksimiarvoa 28,6 m³/s.

6.3 Laskeminen Savunpoisto RIL 232-2008 excel-ohjelmalla

Käsilaskentamenetelmän laskentatuloksia tukemaan käytettiin Inspecta Oy:n Pekka Kallioniemen mitoitusohjelmaa. Ohjelma on tehty RIL 232-2008:aan perustuen, ja sen avulla voi laskea savunpoiston ilmamääriä kätevästi. Ohjelma laskee vakiopalotehotilanteen ilmamäärän automaatiotasolle III. Kuvassa 11 on esitetty ohjelman ulkoasu.



Kuva 11. Ohjelman etusivu [13]

Ohjelman laskennassa käytettiin samoja lähtöarvoja kuin käsilaskentamenetelmässä, jotta voitiin varmistaa tuloksien oikeellisuus. Ohjelmaan tuli syöttää liiketilan mittatiedot: leveys, pituus ja korkeus metreinä. Liiketilan lämpötiloihin liittyen syötettiin ympäristön lämpötilaksi 15 °C ja sallituksi maksimilämpötilaksi 200 °C. Savusululle piti antaa arvoksi 2,2 m, jotta savuttomaksi korkeudeksi saatiin käsilaskentaa vastaava 3 m. Toimialaluokaksi valittiin ”Muu kohde” ja käyttötarkoitukseksi ”Suurmyymälä”. Savunpoistoluokkana käytettiin luokkaa 1, koska liiketila on varustettu sprinklerijärjestelmällä. [13]

YHDEN SAVULOHKON AUTOMAATTINEN SAVUNPOISTO

Osastossa on vain yksi savulohko

Savulohkon mitat (m)	Korkeus	Leveys	Pituus	S-lohko>	Pinta-ala
	5,1	43	43		1 818 m ²

Ohjeet kommenteissa
Enter tiedonsyötön jälkeen
Kommenteissa solun ohje
Kommentit näkyviin

Lämpötila-kriteerit	Ympäristön lämpötila °C	Maksimi °C	Laske		
	15	200	AUTOMAATTI TASO III 650 250 kW/m ²		
Savunpoistoaukon paikka	Savukerroksen alapinta	Savuton korkeus			
0,0	katosta aukosta	minimi valittu			
Savusulku	2,2	2,1 m	2,1 m	3,0 m	3,0 m
<input checked="" type="checkbox"/> Savuvirtausta estäviä rakenteita on	Savusulku on riittävän korkea				
Savuvirtauksen leveys:	43	Korkeus:	0,4 m	Este:	0,1
< taulukot 3-6 Toimialaluokka RIL 232:ssa taulukot 3-6> Taulukko 7					
<input type="button" value="Tuotanto"/> <input type="button" value="Varasto 1-3 m"/> <input type="button" value="Varasto 4-6 m"/> <input type="button" value="Muu kohde"/> <input type="button" value="Atrium"/>					
Käyttötarkoitus					
SL 3 Suur mv v mäl ät					
Savunpoistoluokka					
SP1: Savunpoistoluokka 1					
Mitoituspalo	Ala	Piiri	Tiheys; kW/m ²		
Palon alan ja piirin voi muuttaa	m ²	m	Maksimi	Minimi	
	9	10	1250	250	
	Suuremman palotiheyden oletusarvo		250	650 kW/m ²	
Määritä palotiheys (Tee se tapauskohtaisesti !)->			650	650 kW/m ²	
Suojaustaso					
<input type="radio"/> Tavanomainen <input type="radio"/> Paloilmoitin ja kuulutus <input type="radio"/> Sprinklaus					
Suurempi palotiheys määrää koneellisen savunpoiston					
Suurempi palotiheys määrää luonnollisen savunpoiston					
Alkusivulle					
Lopeta tallentamatta laskelmia					

Kuva 12. Ohjelman laskentasisi, jonne syötettiin laskennan lähtöarvot. Punaisella viivalla rajattuna laskennan tilavuusvirrat. [13]

Mitoituspalon pinta-alan ja piirin ohjelma päätteli valitun käyttötarkoituksen ja savunpoistoluokan mukaan. Palotiheyden ylärajaksi ohjelmaan syötettiin taulukosta 4 saatu arvo 650 kW/m². Palotiheyden alarajan ohjelma valitsi itse. Suojaustasoksi valittiin taso, joka sisälsi paloilmittimet ja kuulutusjärjestelmän. Tietojen syöttämisen jälkeen painettiin ”Laske”-nappia, minkä jälkeen ohjelma teki laskutoimituksen ja tulosti tulokset. [13] Kuvassa 12 on esitetty ohjelman laskentasisi ja tulokset. Punaisella rajatun ellipsin sisällä on ohjelman laskema tilavuusvirran ala- ja yläraja.

Tuloksien ala- ja ylärajat listattiin alla olevaan listaan käsilaskennan ja ohjelmalaskennan osalta:

	<u>Ohjelma</u>	<u>Käsilaskenta</u>
<i>Paloteho:</i>	<i>1,6...4,1 MW</i>	<i>1,6...4,1 MW</i>
<i>Massavirta:</i>	<i>9,9...21,3 kg/s</i>	<i>9,9...21,3 kg/s</i>
<i>Savunpatjan lämpötila:</i>	<i>168...200 °C</i>	<i>168...200 °C</i>
<i>Savunpoistoala:</i>	<i>3,9...8,0 m²</i>	<i>3,9...8,0 m²</i>
<i>Tilavuusvirta:</i>	<i>12,4...28,5 m³/s</i>	<i>12,3...28,6 m³/s</i>

Laskentatulokset täsmäsivät käsilaskentamenetelmän tuloksien ja ohjelman laskemien tuloksien välillä pääosin. Ainoastaan tilavuusvirran osalta vääristymää oli yhden desimaalin verran. Todettiin laskentatulosten olevan luotettavia ja onnistuneita.

7 Laskeminen 2 m:n savuttomalla minimikorkeudella

Koska palosimuloinnissa käytettiin kahden metrin minimikorkeutta, laskin vertailun vuoksi savunpoiston ilmamäärän kahden metrin minimikorkeudella. Näin tehtiin siksi, että saatiin vertailukelpoinen ilmamäärä palosimuloinnin kanssa. Normaalisti määräykset vaativat kolmen metrin savuttoman minimikorkeuden. Laskenta tehtiin samoilla kaavoilla kuin kohdassa 6.2. Poikkeuksena kaavassa 2 käytettiin savuttomana minimikorkeutena arvoa 2 m.

$$m_p = 0,19 \cdot 10 \text{ m} \cdot 2 \text{ m}^{3/2} = 5,37 \text{ kg / s} \quad (2)$$

p_f on 10 m

Z on 2 m

Syntyvän savukaasun massavirraksi saatiin 9,87 kg/s sijaan 5,37 kg/s.

Ilmamäärän laskemiseksi jatkettiin laskemista normaalisti kohtien 6.2.4, 6.2.5 ja 6.2.7 mukaisesti. Laskennat osoittivat, että poistettavan ilmamäärän minimiarvo putosi arvoon 7,2 m³/s. Mitoittava ilmamäärä säilyi entisellään 28,6 m³/s.

Ratkaiseva tekijä savunpoiston mitoittavan ilmamäärän säilymiselle oli kaavalla 4 laskettu savupatjan lämpötila (733 K). Arvo ylitti henkilövyöhykkeelle asetetun kriittisen lämpötilan (473 K), jonka myötä kaavassa 6 käytettiin samoja arvoja kuin aiemmin.

$$m_v = \frac{4095000 \text{ W}}{(473,15 \text{ K} - 288,15 \text{ K}) \cdot 1040 \text{ J / kgK}} = 21,3 \text{ kg / s} \quad (6)$$

Q_c on 4095000 W

θ on 473,15 K – 288,15 K

c on 1040 J/kgK

Poistettavan savukaasun massavirraksi saatiin sama arvo 21,3 kg/s.

Savukaasuvirran laskemisessa käytettiin kaavaa 11. Poikkeuksena savukaasuvirran alarajan laskemisessa käytettiin 5,37 kg/s. Ylärajan laskeminen suoritettiin, kuten kohdassa 6.2.7.

$$V_{vala} = \frac{1,0 \cdot 5,37 \text{ kg / s} \cdot 473,15 \text{ K}}{1,225 \text{ kg / m}^3 \cdot 288,15 \text{ K}} = 7,2 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (11)$$

$$V_{vylä} = \frac{1,0 \cdot 21,3 \text{ kg / s} \cdot 473,15 \text{ K}}{1,225 \text{ kg / m}^3 \cdot 288,15 \text{ K}} = 28,6 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (11)$$

m_v on 5,37...21,3 kg/s

α on 1,0

T_s on 473,15 K

ρ_0 on 1,225 kg/m³

T_0 on 288,15 K

Savukaasuvirraksi laskettiin 7,2...28,6 m³/s. Mitoittavaksi ilmavirraksi saatiin sama maksimiarvoa 28,6 m³/s kuin määräysten mukaisella 3 metrin savuttomalla minimikorkeudella. Kohdan 6.3 excel-ohjelmalla laskeminen ei onnistunut kahden metrin minimikorkeutta käyttämällä, sillä ohjelma ei suostunut käyttämään alle kolmen metrin savutonta minimikorkeutta.

8 Palosimulointi

Simulointi tarkoittaa tietokoneohjelmalla tehtyä havainnollistamista palotilanteesta. Ohjelmassa mallinnetaan arkkitehtisuunnitelmia vastaava tila, jonne simuloidaan tulipalo. Simuloinnissa asetetaan lähtökohdat ja kriteerit, joita noudattaen simuloidaan mahdollisimman todennukainen palotilanne. Asetettujen lähtökohtien täyttymiseksi tulee savunpoiston olla riittävän tehokas, jotta ihmisten turvallinen poistuminen on taattu. [10]

8.1 Käytetyt laskentamallit ja ohjelmat

Laskentamalleina käytettiin NISTin FPE Tools:n versiota 3.20 sekä FDS-kenttämalliohjelman versiota 5.1. FPE Toolsin avulla laskettiin sprinklerin laukeamiseen kuluvaa aikaa. Palon mallintamiseen ja tulosten laskentaan käytettiin FDS-ohjelmaa.

Tulosten esittämisessä käytettiin NISTin SmokeView-versiota 5.1 sekä Microsoftin Office-ohjelmistoa. Poistumisaikojen laskentaan käytettiin Simulex-ohjelman versiota 1.2. Poistumisaikojen laskennassa jokaista kerrosta tutkittiin omana poistumisalueenaan, johtuen ohjelmallisista rajoitteista (henkilömäärä, uloskäytävien lukumäärä). [11, s. 6.]

8.2 Palon ja savun leviämisen tarkastelu

Savun leviämisen simuloinnissa käytettiin NISTin kenttämallisimulointiin tarkoitettua Fire Dynamics Simulator 5.1 -ohjelmaa. Ohjelmaa on kehitetty yli 25 vuotta, ja se on parhaiten dokumentoituja ja validoituja palosimulointiohjelmia. Ohjelman manuaalin mukaan ohjelma laskee lämpötiloja ja kaasun virtausnopeuksia erittäin tarkasti (marginaali 5–20 %). Tarkkuuteen vaikuttavat käyttäjän tekemät valinnat mm. solukoossa. Ohjelman validoinnista todetaan, että savun leviämisen tarkastelu on hyvinkin tarkkaa, tosin lähtöarvojen oikeellisuudesta täysin riippuvaista.

Ohjelma on tällä hetkellä paras käytettävissä oleva väline savun leviämisen simulointiin ja visualisointiin, ja joka tapauksessa paljon tarkempi kuin perinteisesti käytetyt käsilaskentamallit tai vanhemmat simuloinnissa käytetyt vyöhykemallit. [11, s. 6–7.]

8.3 Palosimuloinnin lähtöarvot ja tehdyt oletukset

Oletettuun palonkehitykseen perustuvan simuloinnin tavoitteena oli tarkastella palon ja savun leviämistä palon alkuvaiheessa. Simuloinnin lähtöarvojen määrittelyä varten autosuojan osalta laadittiin erillinen asiakirja. Asiakirja lähetettiin pelastusviranomaiselle kommentoitavaksi. Liiketilojen simuloinnista ei ole laadittu erillistä lähtöarvojen määrittelyasiakirjaa, mutta asiaa on käsitelty yhdessä pelastusviranomaisen kanssa käydyssä neuvottelussa. Autosuojan simuloinnit toteutettiin vuoden 2008 kesän ja alkusyksyn aikana. Liiketilojen simuloinnit toteutettiin vuodenvaihteessa 2008–2009.

Oletuksena oli, että palokunnan ensimmäisten yksiköiden toimintavalmiusaika on noin kymmenen minuuttia. Kun tähän lisätään tiedusteluun ja letkujen selvitykseen kuluva aika, on palo ehtinyt kehittyä jo noin 15 minuuttia ennen sammutuksen aloittamista. Rakennuksen paloturvallisuutta tarkasteltaessa on oleellista tietää, minkälaiset olosuhteet rakennuksen sisällä ovat oletetulla sammutuksen alkamishetkellä. Tämän tiedon avulla voidaan arvioida onko palokunnalla realistisia mahdollisuuksia rajoittaa tai sammuttaa paloa ja voidaanko savunhallinnan ja savunpoiston avulla parantaa sammutustyön edellytyksiä. [11, s. 7.]

8.4 Liiketilojen tarkastelussa käytetyt lähtöarvot ja oletukset

Liiketilojen tarkastelussa käytettiin seuraavia lähtöarvoja ja oletuksia [11, s. 8]:

- Kenttämallin laskennan tehostamiseksi malli jaettiin 3–8 eri laskenta-alueeseen, joissa oli mahdollista käyttää erilaisia laskentahiloja (käsittää koko kauppakeskuksen).
- Mallin laskentakorkeutena käytettiin 3,3 – 25,3:a metriä kerroskorkeuksien mukaisesti.

- Solukokona käytettiin lähellä paloa ja tarkastelun kannalta mielenkiintoisemmilla alueilla 0,6 metrin hiloja. Muualla mallissa käytettiin 1,2 metrin hiloja. Solukokoa rajoittavana tekijänä oli ajankäytölliset ja laskentatehoon liittyvät syyt.
- Solujen kokonaismäärä vaihteli skenaariosta riippuen välillä 852 800–1 766 100.
- Solukoon vaikutusta ei tarkasteltu erikseen, koska mitoituspalo sijoitettiin kolmeen eri paikkaan.
- Mitoituspaloksi valittiin ns. pakotettu paloteho, jossa ohjelma ei laske palon kehittymistä.
- Mitoituspalon määrittelyssä sprinklerin oletettiin toimivan. Skenaario, jossa sprinklerin toimintaa ei huomioida, toimii vertailutilanteena.
- Mitoituspalot sijoitettiin kauppakeskuksessa kolmeen eri kohtaan.
- Paloreaktiona käytettiin sekoitetta, jossa savun nokipitoisuus on kolminkertainen puun nokipitoisuuteen nähden. Lisäksi kahdessa skenaariossa käytettiin polypropeenin paloreaktiota, missä savun nokipitoisuus on viisinkertainen puuhun nähden.
- Simuloinnissa ei ole tutkittu savunpoiston toimimattomuutta.
- Paloja simuloitiin 30 minuutin ajan, mikä katsottiin riittäväksi simuloinnin tarkoitukseen nähden (sammutustoiminta).
- Palotehon päätettiin ainoastaan rajoittuvan sprinklerin toimiessa. Sammumista ei huomioitu.

- Mitoituspaloissa ei käytetty alkupaloa. Alkupalon vaikutus tuloksiin on ajallisesti merkittävä. Ilman alkupaloa muutokset olosuhteissa tapahtuvat nopeasti palotehon nopean kasvun johdosta.

8.5 Mitoituspalo

Liiketilän mitoituspalot valittiin kokemusperäisesti mahdollisimman todellisia tilanteita vastaavina. Sprinklerin laukeamislämpötilana käytettiin 68 °C:ta ja RTI-arvona 80:tä. FPETOOLSilla laskettiin sprinklerin laukeamisajat eri tiloissa. Reagointiaikaa tutkittiin myös FDS:n laskemien tulosten perusteella. Kauppakeskuksessa tutkittiin laukeamisaikaa myös FDS:n avulla. FDS laski reagointiajaksi 362 sekuntia, jolloin paloteho oli noin 13 000 kW. FPETOOLS laski kauppakeskuksen puolella reagoimiseen vaadittavan 6 500 kW:n palotehoa. Vakioituna palotehona käytettiin 13 000 kW:a. [11, s. 9]

8.6 Skenaariot ja herkkyytarkastelut

Skenaariot oli valittu arvioimalla kriittisimpiä paloja eri tiloissa. Simuloitavien skenaarioiden määrään vaikuttivat tutkittavat tekijät ja teoriassa skenaarioita olisi voinut olla kohteena olevassa tilassa tuhansia.

Autosuojaan tarkasteluun oli valittu kaksi pääskenaariota ja liiketilaan neljä pääskenaariota. Kaikki skenaariot tarkasteltiin erikseen ja niiden tuloksia vertailtiin toisiinsa. Lisäksi skenaarioissa laadittiin erilaisia vikatilanteita (herkkyytarkastelut). Simuloinnin avulla tarkasteltiin alustavien suunnitelmien mukaisia savunpoistojärjestelyitä. Muutoksia tehtiin joiltakin osin korvausilmareitteihin sekä ilmamäärien mitoituksiin.

Liiketilän savunpoistoon sovellettiin skenaariota 5, koska sen katsottiin olevan liiketilojen osalta kriittisin tila:

Palo 1. kerroksen ”Hypermarketissa” (skenaario 5). Palo sijoitettiin keskeisesti 1. kerroksen Hypermarkettiin. Skenaariossa huomioitiin sprinklerin vaikutus sekä savunpoiston toiminta.

Herkkyystarkastelut:

Herkkyystarkasteluiden tarkoituksena oli selvittää eri muuttujien vaikutusta savunpoistojärjestelmien toimintaan. Eri skenaarioissa käytettiin erityyppisiä paloreaktioita. Paloreaktiot pyrittiin valitsemaan siten, että ne kuvaavat mitoituspaloa parhaiten. Kaikissa skenaarioissa tutkittiin tilannetta, jolloin sprinkleri ei toimi.

[11, s. 11.]

8.7 Poistumisturvallisuuden simulointi

Laskentamallina käytettiin Simulex-poistumisohjelman versiota 1.2. Simulex on laajasti käytetty ja yksi parhaiten validoituja poistumisen mallinnusohjelmia. Kauppakeskuksen kolmen liiketilakerroksen osalta suoritettiin poistumisen simulointi eli poistumisaikalaskelmat. Poistumisaikalaskelman suorittamiselle perusteena pidettiin vertailuluvun saamista savunpoistojärjestelmän mitoittamista ja suunnittelua varten. Toisena perusteena poistumisaikalaskelmien suorittamiselle ovat suuri palo-osastokoko sekä ylitykset etäisyyksissä uloskäytäviin. [11, s. 16.]

8.7.1 Lähtöarvot ja tehdyt oletuksen liiketilojen poistumiseen

Poistujien lukumäärä, tyyppi ja nopeus:

Poistujien lukumäärän perustana oli henkilötiheys 6 m²/henkilö liiketiloissa. Ensimmäisen kerroksen liiketilan osalta nimelliseksi henkilömääräksi saatiin 303 henkilöä. Poistujien tyyppiä valittiin Simulex-ohjelman sisältämä henkilöryhmä ”Shoppers”. Ryhmä sisältää 20 % miehiä, 30 % naisia, 20 % lapsia ja 30 % keskivertoihmisiä. Eri ihmistyytit eroavat mallissa toisistaan fyysisten ulkomittojen osalta. Poistujien liikenopeus oli 0,8–1,7 m/s satunnaisesti vaihdellen henkilöittäin. Simulexissa lähes aina pieni osa ihmisistä jää ruuhkaan, eikä poistu normaalisti. Tällaiset mahdolliset jumiin jääneet poistettiin laskennasta.

Näiden poistujien osuus on tyypillisesti niin pieni (prosentin kymmenyksiä koko poistujamäärästä), ettei toimenpide oleellisesti vaikuta tuloksiin.

Reagointiaika, havaitsemisaika & kokonaispoistumisaika:

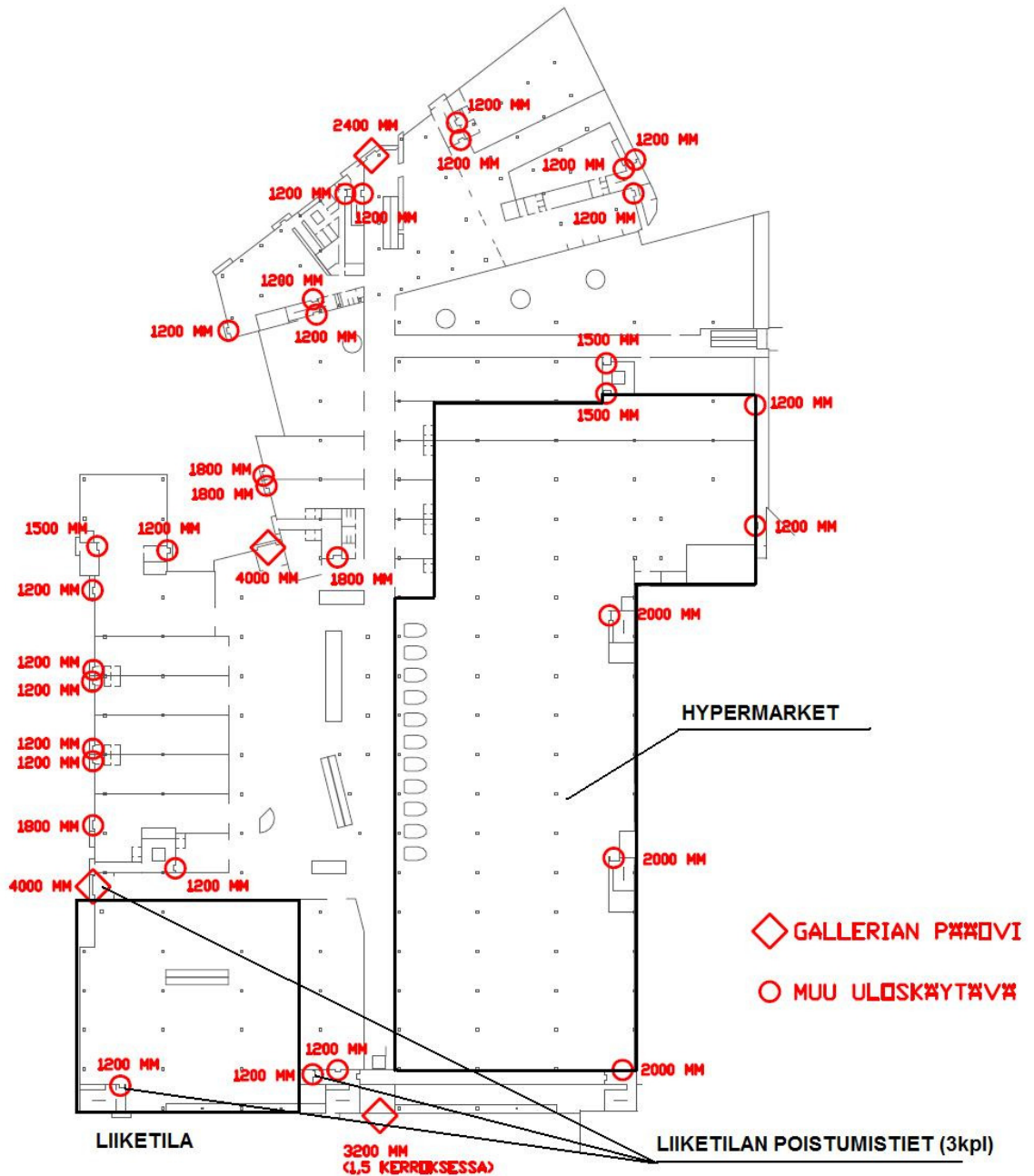
Reagointiajaksi valittiin 60–120 s satunnaisjakaumalla. Reagointiajalla tarkoitetaan viivettä paikallisen palohälytyksen (palokellot / kuulutus) ja henkilöiden poistumisen aloittamisen välillä. Lopullinen kokonaispoistumisaika T_p saadaan laskemalla yhteen havaitsemisaika T_a , reagointiaika T_b ja siirtymisvaiheen kesto T_m ($T_p = T_a + T_b + T_m$). Havaitsemisaikana automaattisella paloilmoinjärjestelmällä varustetussa kohteessa käytetään yleensä 90:tä sekuntia. Turvalliseksi paikaksi, johon asti simulointia ajettiin, katsottiin uloskäytävään johtava ovi. [11, s. 22.]

8.7.2 Liiketilojen poistumistapaukset

Poistumista tarkasteltiin kahdella perusskenaariolla, joissa käytettäviä poistumisreittejä sekä käytössä olevia uloskäytäviä vaihdeltiin [11, s. 23]:

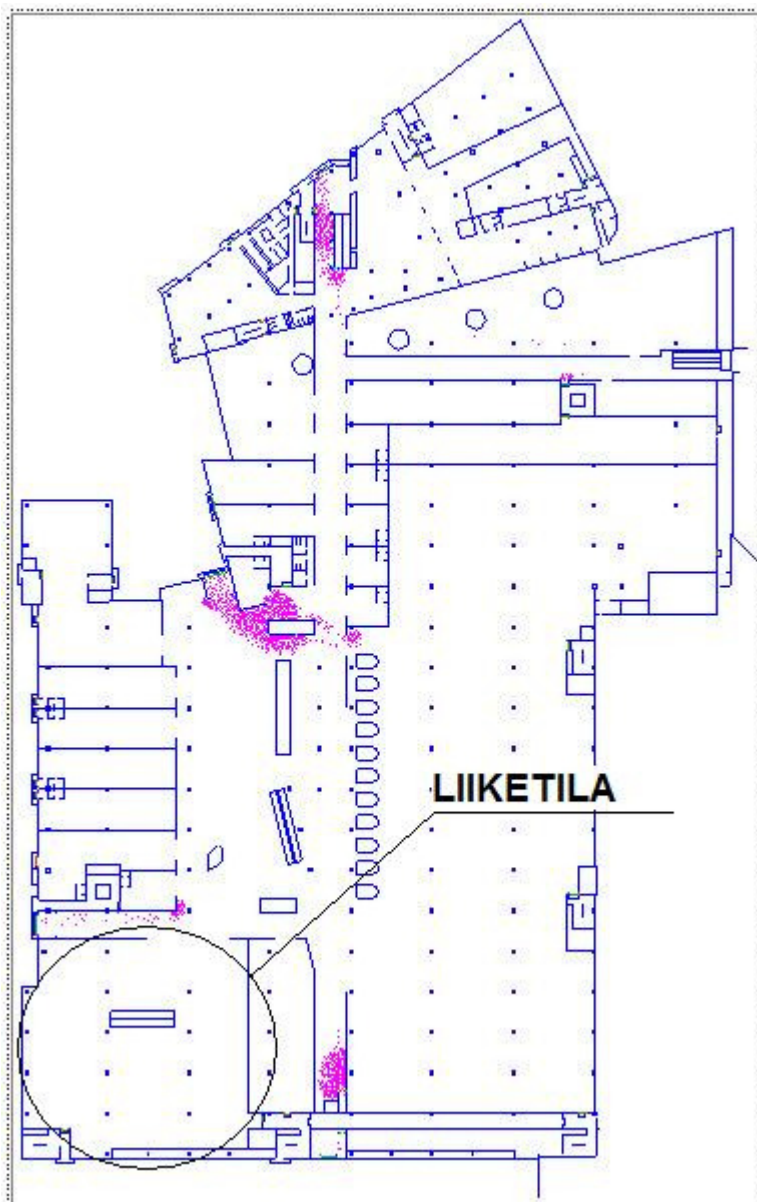
- Skenaariossa 1 kaikki poistuvat lähimpään uloskäytävään.
- Skenaariossa 2 poistuvista henkilöistä 70 % suuntaa kohti normaalien kulkureittien läheisyydessä olevia uloskäytäviä tai suoraan rakennuksen pääoviksi laskettuja uloskäytäviä. Loput 30 % poistuu lähimpään uloskäytävään.
- Lisäksi suoritettiin muutama perusskenaarioista poikkeava tarkastelu: ensimmäisessä kerroksessa suurmyymälän kaikki henkilöt määritettiin poistumaan gallerian pääovien kautta ja toisessa kerroksessa skenaariosta 2 tehtiin muunnelmä, jossa neljä normaalia uloskäytävää poistettiin käytöstä palosimuloinnin tuloksien perusteella.

Arkkitehtisuunnitelmien mukaisten uloskäytävien sijainnit ja leveydet ensimmäisessä kerroksessa on esitetty kuvassa 13. Lisäksi kuvaan on merkattu liiketilan poistumistiet ja skenaario 5:n hypermarket.



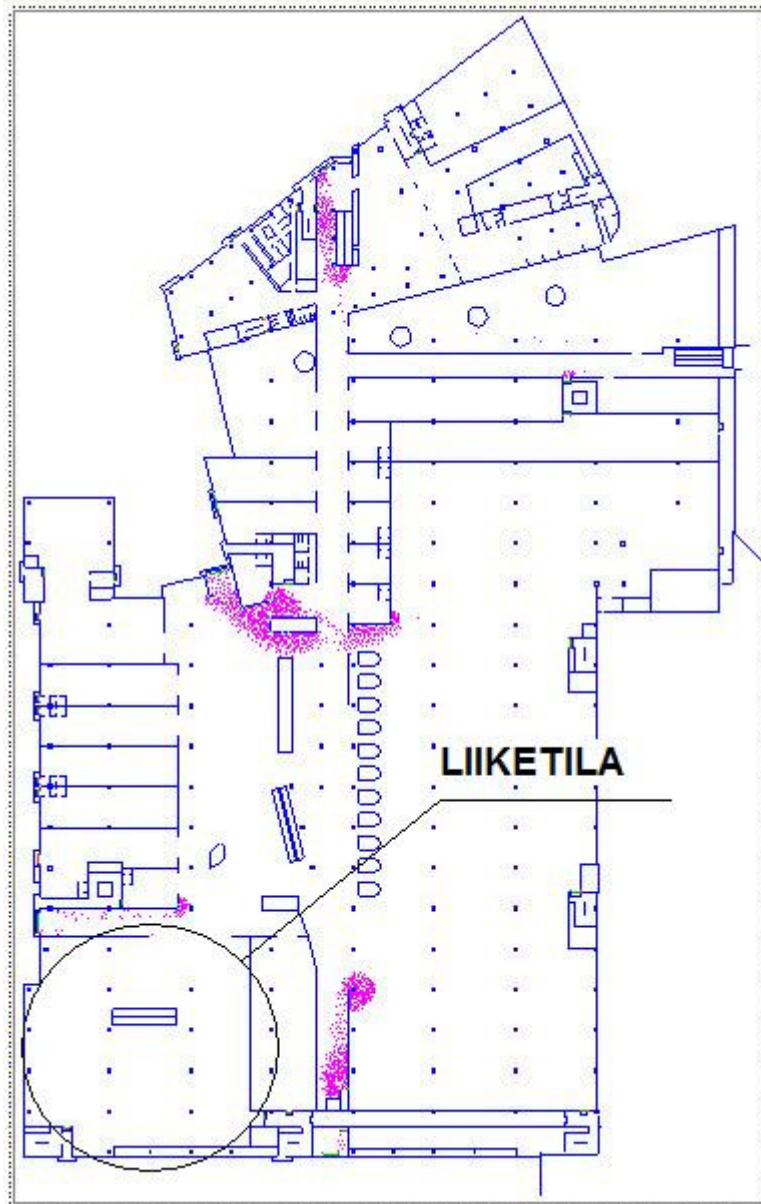
Kuva 13. Ensimmäisen kerroksen uloskäytävien sijainnit ja leveydet. Pääovet, joille 70 % poistujista suuntaa skenaariossa 2, on esitetty vinoneliöllä, muut uloskäytävät ympyröinä. Tarkasteltava liiketila rajattu mustalla nelikulmiolla ja poistumistiet osoitettu mustin viivoin (3 kpl). Lisäksi skenaario 5 "hypermarket" rajattu mustin viivoin. [11, s. 24]

1. kerroksessa suoritettiin kaksi tarkastelua: perusskenaario 2 (70 % pääovien suuntaan, loput lähimpään) ja skenaarion 2 muunnelma, jossa suurmyymälän (iso liiketila oikealla, kuva 14) kaikki henkilöt poistuivat pääovien suuntaan ja muista tiloista perusskenaarion 2 mukaisesti. Kuvassa 14 esitetyt lilat pisteet kuvaavat ihmisiä. 270 sekunnin aikana tarkasteltava liiketila tyhjeni ihmisistä kokonaan. Poistumisen eteneminen ajan funktiona on esitetty kuvassa 14. [11, s. 28.]



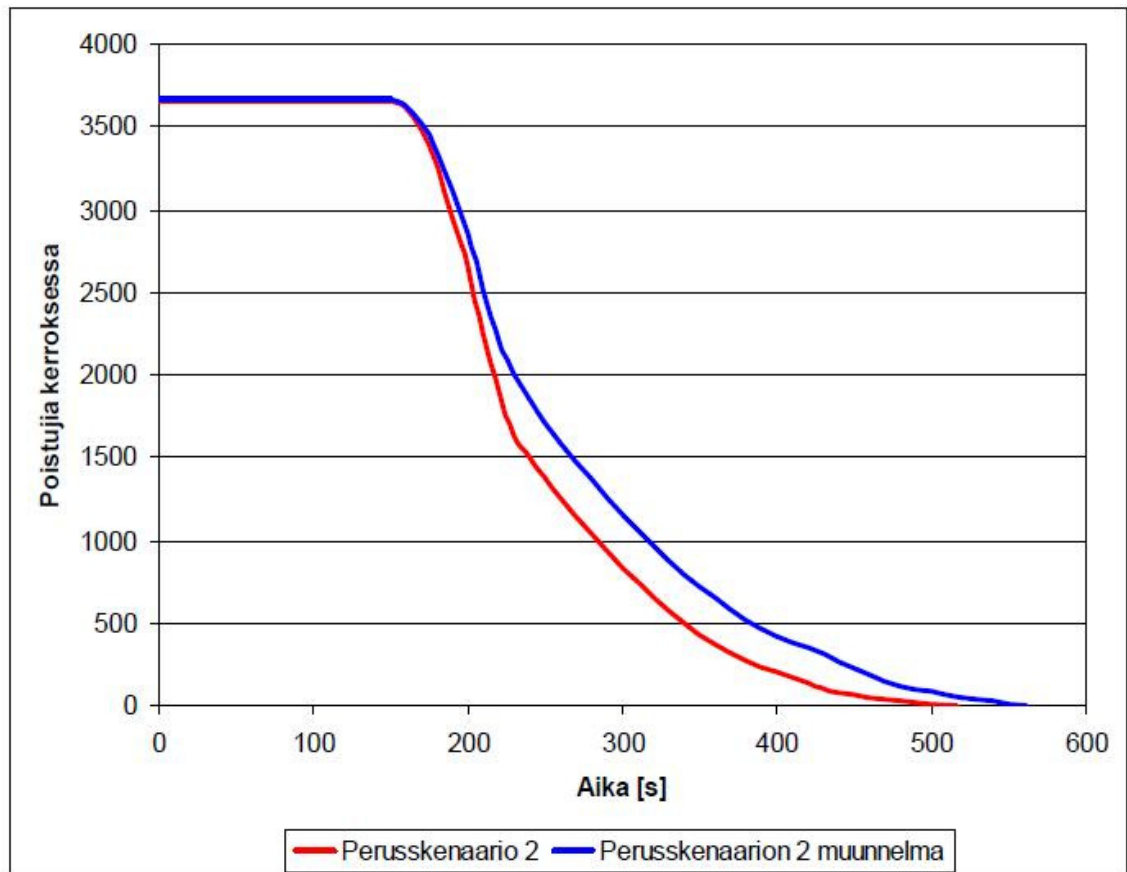
Kuva 14. Ensimmäinen kerros, perusskenaario 2 (70 % normaaliin kulkusuuntaan), t=270 s. [11, s. 29]

Skenaarioon sijoitettiin henkilöitä yhteensä 3659. Kokonaispoistumisajaksi muodostui 516 sekuntia eli 8 minuuttia 36 sekuntia. Suurmyymälän tyhjeneminen kesti 290 sekuntia eli 4 minuuttia 50 sekuntia (kuva 15). [11, s. 29.]



Kuva 15. Ensimmäinen kerros, muunnettu skenaario 2, suurmyymälästä kaikki gallerian uloskäytäviin, $t = 270$ s. [11, s. 30]

Skenaarioon sijoitettiin henkilöitä yhteensä 3 667. Henkilömäärä ero on vähäinen perusskenaarioon verrattuna (+8 kpl), eikä sillä ole kokonaispoistumisaikaan vaikutusta. Kokonaispoistumisajaksi muodostui 561 sekuntia eli 9 minuuttia 21 sekuntia. Suurmyymälän tyhjeneminen kesti 350 sekuntia eli 5 minuuttia 50 sekuntia (kuva 16). [11, s. 30.]



Kuva 16. Poistumisen eteneminen ajan funktiona ensimmäisessä kerroksessa. Perusskenaarion 2 muunnelmassa suurmyymälän kaikki henkilöt poistuivat gallerian pääuloskäytäviin ja muiden tilojen henkilöt perusskenaarion 2 mukaisesti (70 % pääoville, 30 % lähimpään). [11, s. 31]

8.8 Liiketilän poistumislaskelmien yhteenveto

Kohteesta on laadittu erillinen toiminnallinen tarkastelu savun leviämisen ja kriittisten olosuhteiden määrittämiseksi, jolloin saatujen poistumisaikojen riittävyyttä voidaan arvioida. Kokonaispoistumisajan osalta tarkastelussa on varmuusmarginaaleja.

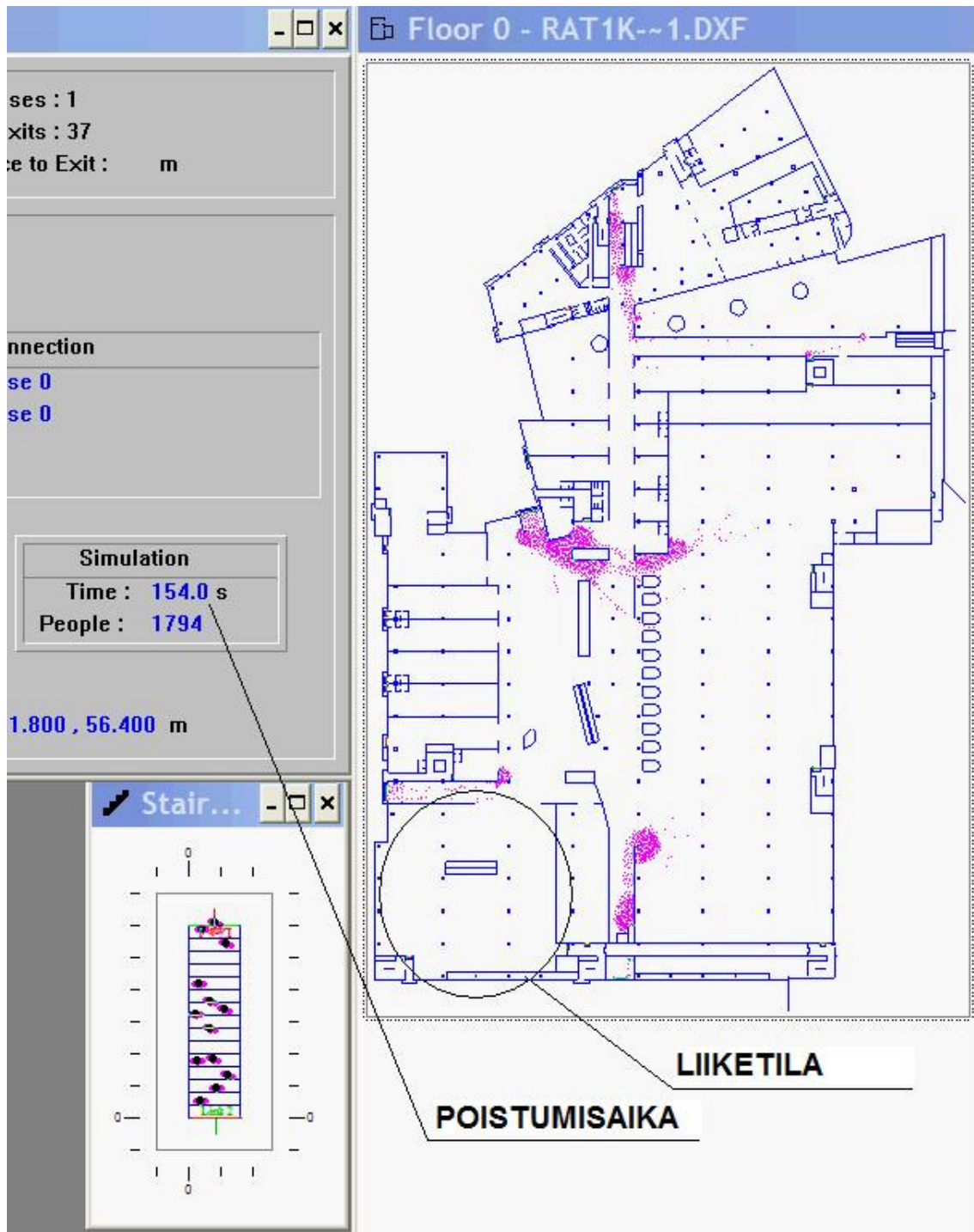
Havaitsemisaikana on käytetty 90 sekuntia, kun laskennalliset ilmaisuajat evakuointikäskyyn olivat 20-30 sekuntia. Varmuusmarginaali kokonais-poistumisaikoihin olisi 10 – 23 %. Lisäksi oleellisena tekijänä pitää huomioida laskelmissa käytetyt henkilömäärät, jotka ovat todellisiin henkilömääriin verrattuna ylimitoitettuja kaupan alan tilastoihin verrattuna.

Taulukossa 5 on yhteenveto kaikista tarkastelluista tapauksista. Esitetyt ajat ovat sekunteina sisältäen havaitsemis-, reagointi- ja siirtymisajan uloskäytävään. Tarkasteltavista kerroksista liiketilaa koskeva poistumisaika on esitetty kohdassa 1K: skenaariot 2 ja 2 muunnos. Lisäksi taulukossa 5 on esitetty hypermarketia koskeva poistumisaika. [11, s. 41.]

Taulukko 5. Poistumisaikojen yhteenveto [11, s. 41]

	Henkilöitä	Poistumisaika (reagointi- + siirtymisvaihe)	Muuta
1K			
Skenaario 2	3659	516	Suurmyymälä tyhjä 290 s
Skenaario 2 muunnos	3667	561	Suurmyymälä tyhjä 350 s
2K			
Kauppakeskus			
Skenaario 1	2741	308	
Skenaario 2	2742	431	
Skenaario 2 muunnos	2705	442	
Autotuonti			
Skenaario 1	776	306	
Skenaario 2	776	343	
3K			
Kauppakeskus			
Skenaario 1	2205	321	
Skenaario 2	2187	367	
Autotuonti			
Skenaario 1	345	235	
Skenaario 2	345	258	

Poistumisaikavideoita katselemalla havaittiin tarkasteltavan liiketilan tyhjenevän jopa 154 sekunnin aikana. Kuvassa 17 on esitetty poistumisaikavideosta napattu havainto, kun aikaa on kulunut 154 sekuntia.



Kuva 17. Ensimmäinen kerroksen poistumistilanne ajassa 154 sekuntia [12].

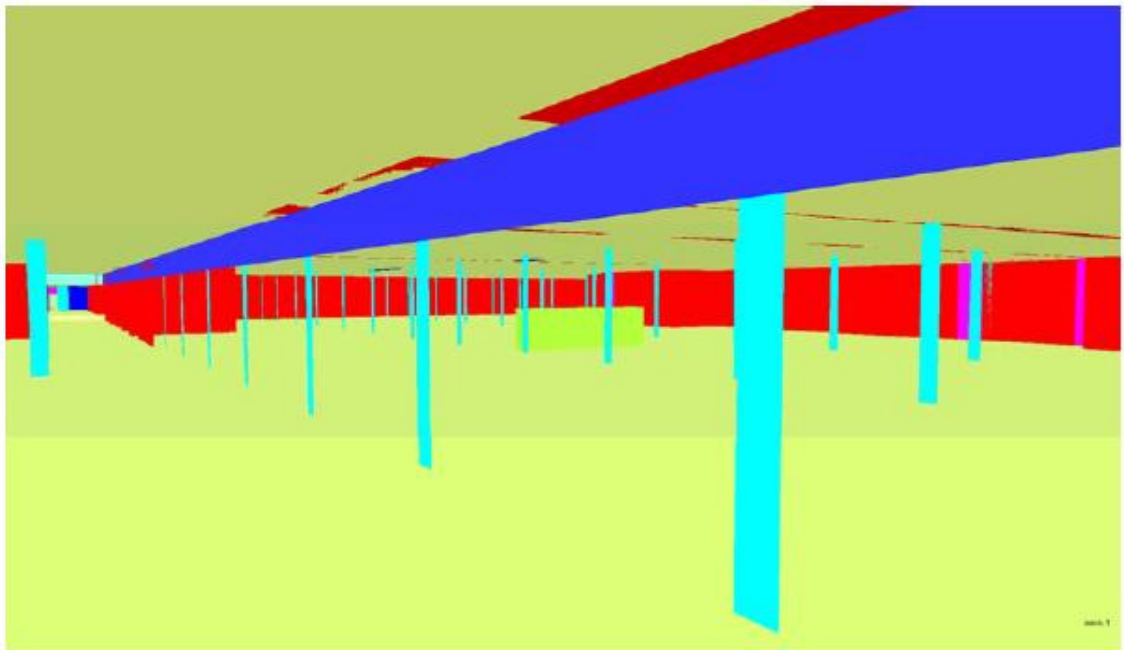
8.9 Palosimulointitulosten tarkasteluja

Seuraavissa kohdissa on esitetty kaavioiden ja Smokeview-ohjelmasta saatujen kuvien avulla liiketiloissa tehtyjen simulointien tuloksia. Kaavioissa oleva pystyviiva kuvaa vertailtavaa poistumisaikaa.

Hypermarkettiin sijoitettiin ns. kenkähyllypalo. Paloa simuloitiin kahdella eri tilanteella:

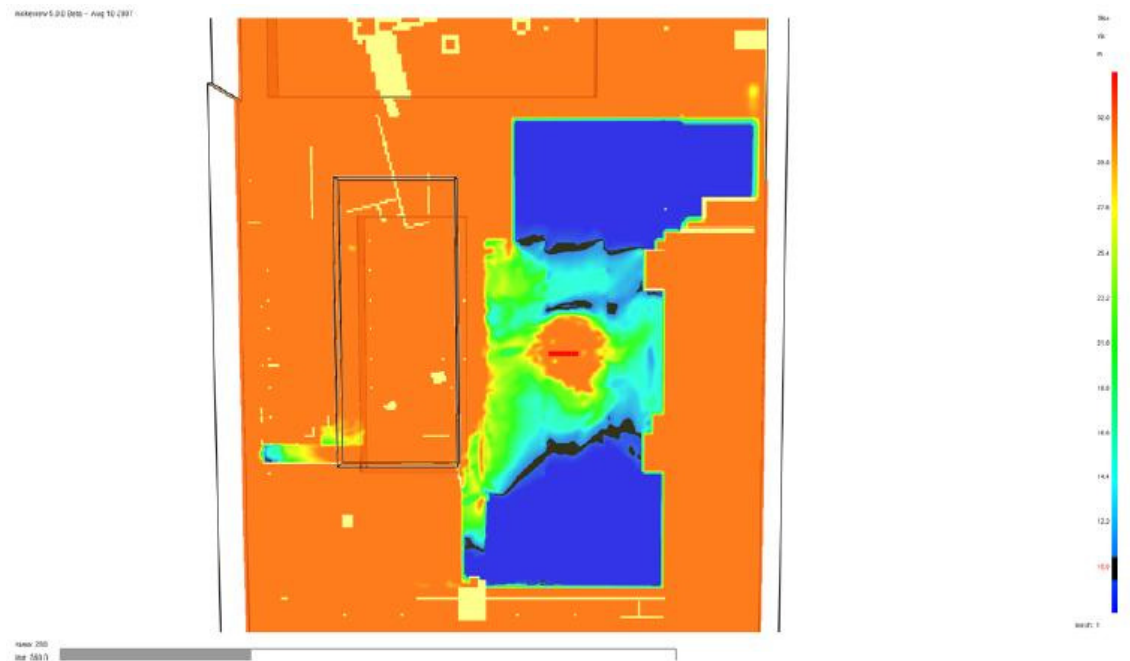
- Normaalitilanne, jolloin sprinkleri rajoittaa paloa ja savunpoisto toimii.
- Poikkeava tilanne, jolloin sprinkleri, eikä savunpoisto toimi, vuotoja korvausilma-aukoista.

Paloreaktiona käytettiin molemmissa tilanteissa polypropeenaa, jonka savukaasun nokipitoisuus on viisinkertainen puun paloreaktioon verrattuna. Kenkähyllypalo tai päivittäistavaran hyllypalo yleisesti voi olla muovipitoista, jolloin reaktion käyttäminen on perusteltua. [11, s. 60.]



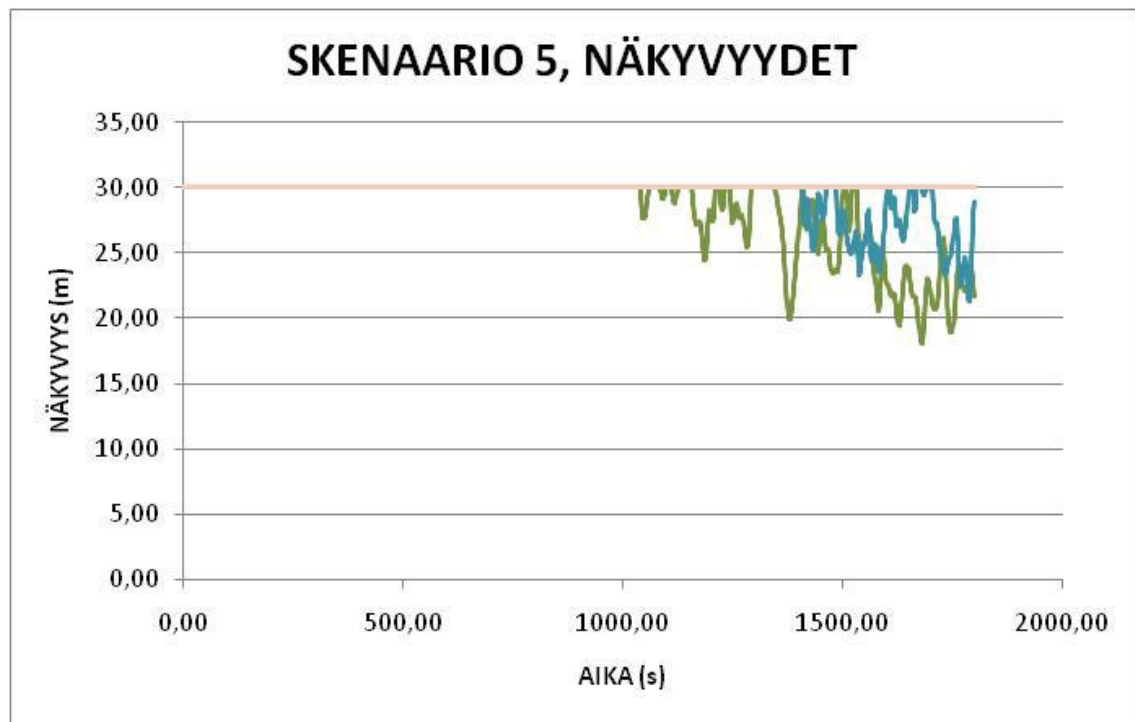
Kuva 18. Skenaarion 5 alkutilanne galleriakäytävältä päin katsottuna. Keskellä kuvaa on vihreällä laatikolla esitetty kenkähyllä. [11, s. 60]

Savunpoistoa simuloitiin erilaisilla ilmamäärillä. Lopulliseksi mitoituksiksi saatiin prosenttimitoituksiksi muunnettuna 0,43 % liiketiloihin. Kaikissa tilanteissa korvausilmaa johdettiin liiketilaan galleriakäytävän kautta. Savunpoiston käynnistäminen tapahtui 90 sekunnin kohdalla.



Kuva 19. Skenaarion 5 näkyvyysleikkaus hypermarketissa, kun 1. kerroksen ihmiset ovat poistuneet. Ei sprinkleriä, ei savunpoistoa. [11, s. 61]

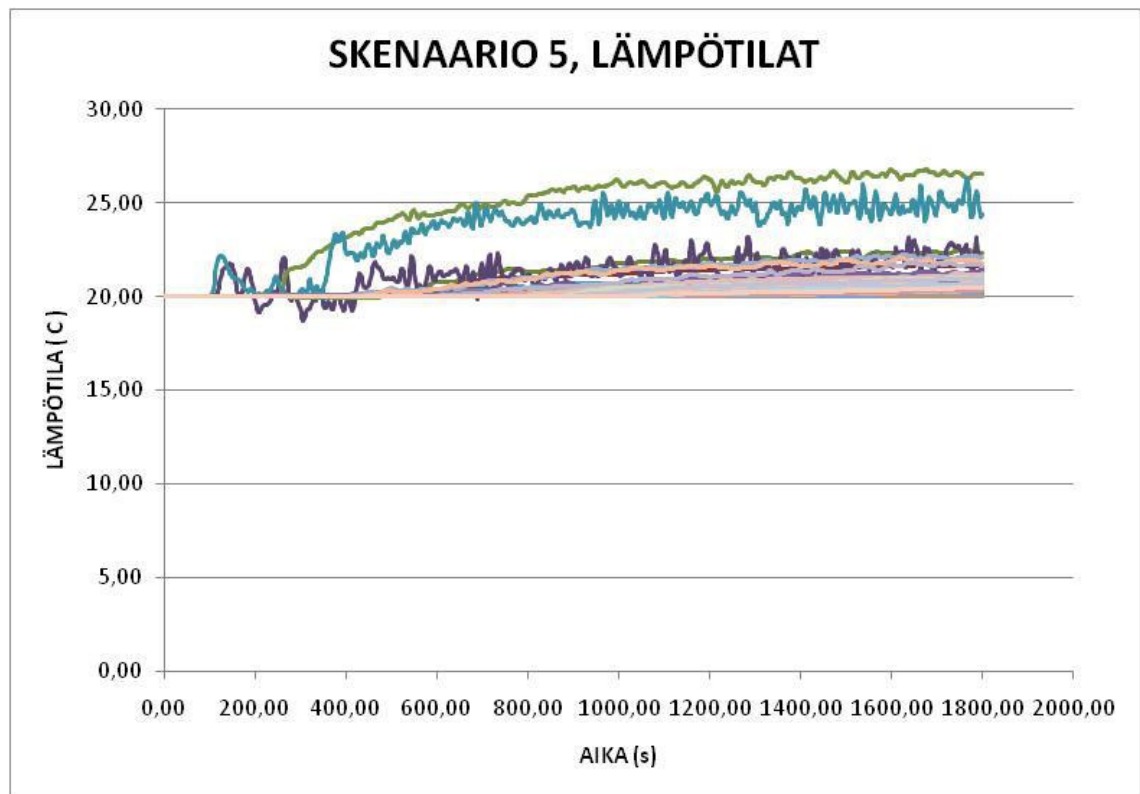
Ensimmäisen kerroksen näkyvyysleikkaus kuvassa 19 osoitti, että ensimmäisen kerroksen hypermarketin alue on erittäin savuinen, kun ensimmäisen kerroksen ihmiset ovat poistuneet. Ilman savunpoistoa ja sprinklereitä olosuhteiden kelvollisuus on selvästi vaarallisella puolella.



Kuva 20. Skenaarion 5 näkyvyydet [11, s. 61].

Sprinklerin ja savunpoiston toimiessa skenaarion 5 mittaustuloksissa tapahtui näkyvyyden osalta muutoksia vain kahden uloskäytävän osalta koko simulointiaikana. Muutokset tapahtuivat ensimmäisen kerroksen hypermarketin kahden uloskäytävän kohdalla. Kuvassa 20 on esitetty näkyvyys ajan funktiona kun savunpoisto ja automaattinen sammutuslaitteisto ovat toiminnassa. Näkyvyys oli 30 metriä aina 1000 sekuntiin asti.

Lämpötilamuutokset olivat vain joitakin asteita. Lämpötilan ja näkyvyyden mittaustuloksia vertailtaessa tuli huomioida, että mittauskorkeuksissa oli 1 metrin ero. Lämpötila mitattiin kerroksittain 1 metrin korkeammalta kuin näkyvyys. [11, s. 60–62.] Kuvassa 21 on esitetty lämpötilan kehitys ajan funktiona hypermarketissa.



Kuva 21. Skenaarion 5 perustapauksen lämpötilakehitys hypermarketissa [11, s. 62].

8.9.1 Savunpoiston ilmamäärän laskeminen liiketilaan

Simuloinnissa käytettiin seuraavia lähtötietoja:

- henkilöiheys savulohkolla $6 \text{ m}^2/\text{hlö}$
- henkilöiden määrä savulohkolla 303 hlö
- ihmisten siirtymisaika uloskäytäviin = poistumisaika savulohkolta 154 s
- savulohkon oleskeluvyöhykkeen lämpötila alle 100 °C ihmisten siirtymisen ajan
- savuton korkeus savulohkolla 2 m poistumisen aikana
- näkyvyys 10 m poistumisen aikana
- savunpoiston ilmamäärä $13,9 \text{ m}^3/\text{s}$.

Simuloinnissa tarkkailtiin savulohkosta poistuvien ihmisten näkyvyyttä ajan funktiona kun savunpoiston ilmavirta oli $13,4 \text{ m}^3/\text{s}$. Näkyvyyden alarajana pidettiin 10 metriä, joka on kokemusten mukaan vielä riittävä ihmisten poistumiseen. Ihmisten poistuminen savulohkolta vaati aikaa 154 s. [10]

Simulointi osoitti, että savunpoiston ilmavirta $13,4 \text{ m}^3/\text{s}$ riitti huuhtelevaan liiketilaa tarpeeksi tehokkaasti. Ihmiset näkivät koko poistumisen ajan vähintään 10 m eteenpäin ja liiketila tyhjeni ihmisistä 154 s:ssa. Lämpötila poistumisen aikana ei noussut missään vaiheessa yli $100 \text{ }^\circ\text{C}$:n. [10]

Simuloinnissa käytettiin ensimmäisen kerroksen liiketilaa, joka oli varustettu sammutusjärjestelmällä (sprinkleri) ja savunpoistolla. Sprinklerin oletettiin toimivan palotilanteessa oikein. Näkyvyys oli 1 050 sekunnin ajan vähintään 30 m. Ihmisten poistumisajaksi laskettiin 154 sekuntia. Simuloitua savunpoiston ilmamäärää sovellettiin vanhaan prosenttilaskukaavaan. Liiketilojen savunpoiston ilmamääräksi riittäisi 0,36 % prosenttimitoituksella, mutta suunnittelussa lisättiin 20 %:n varmuusmarginaali. Käytettävä mitoitus-% on 0,45 %. Kaavalla 13 laskettiin liiketilan savunpoiston ilmamäärä. [10]

$$V_v = A \cdot \% \cdot 1,7 \quad (13)$$

V_v on savunpoiston ilmamäärä [m^3/s]

$\%$ on prosenttia savulohkon pinta-alasta [%]

A on savulohkon pinta-ala [m^2]

1,7 on virtauskerroin [-]

Savunpoiston ilmamäärä liiketilassa:

$$V_v = 1818 \text{ m}^2 \cdot \left(\frac{0,45}{100} \right) \% \cdot 1,7 = 13,9 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (13)$$

$$V_v = ?$$

$$\% = 0,45 \%$$

$$A = 1818 \text{ m}^2$$

$$1,7 = \text{virtauskerroin [-]}$$

Savunpoiston ilmamääräksi laskettiin 13,9 m³/s.

9 Tulosten vertailu

9.1 Ilmamäärät

Palosimuloinnin ja RIL 232-2008:n välinen suurin ero oli savunpoiston ilmamäärä. Simuloinnilla saatu ilmamäärä oli 13,90 m³/s ja vastaavasti RIL 232-2008:lla laskettu ilmamäärä oli 28,60 m³/s. Simuloinnin ilmamäärä oli 106 % pienempi kuin savunpoiston suunnitteluohjeella laskettu ilmamäärä. Käytännössä radikaalisti pienempi savunpoiston ilmamäärä tarkoitti puhallinmäärien pienenemistä, savunpoistokanavien tarpeiden vähenemistä ja pienempiä savunpoistohormeja. Lisäksi korvausilma-aukkojen koko putosi savunpoiston ilmamäärän kanssa samassa suhteessa (106 %).

9.2 Kanavakoot ja määrät

Taulukossa 6 on esitetty suunniteltujen savunpoistokanavien koot ja kappalemäärät liiketilassa. Liiketilan kattorakenteissa oli varattuna 1 000 mm:ä tilaa korkeussuunnassa ja tästä tilasta savunpoistokanaville 800 mm. Kanavat jaettiin 800 mm korkeisiin ja 1 000 mm leveisiin kanttikanaviin.

Ilman nopeus kanavissa suunniteltiin alle arvon 15 m/s. Näillä arvoilla RIL 232-2008:n mukaan laskettu kanavamäärä olisi 4 kpl 800x1000 kanttikanavaa. Simuloinnin ilmamäärillä kanavien lukumäärä putosi puoleen eli savunpoistoon riitti tällöin 2 kpl 800x1000 kanttikanavaa.

Taulukko 6. Savunpoistokanavien koot ja lukumäärät

Laskentatapa	Vv [m ³ /s]	Kanavanopeus [m/s]	Ak (tarve) [m ²]	Kanavakoko [L*K] mm	Ak tot [m ²]	Kanavien lukumäärä [kpl]
Simulointi	13,90	15	0,927	1000*800	0,8	1,16
RIL 232-2008	28,60	15	1,907	1000*800	0,8	2,38

Nousuhormeissa käytettiin kanavanopeutena samaa raja-arvoa kuin liiketilan puoleisissa kanavissa (<15 m/s). Hormeissa suunniteltiin käytettäväksi pyöreitä kanavia Ø1250.

Taulukossa 7 on esitetty savunpoistohormien tarpeet. Simuloinnissa hormien määräksi riitti yksi Ø1250:n kanava. RIL 232-2008:n mukaan laskettu ilmamäärä vaati 2 kpl Ø1250:n nousuhormia katolle, joten liiketilasta vähenisi laskennan mukaisella ratkaisulla yhden Ø1250:n kanavan verran lattiapinta-alaa (1,23 m²). Pinta-alamenetys toistuu myös ylemmissä kerroksissa.

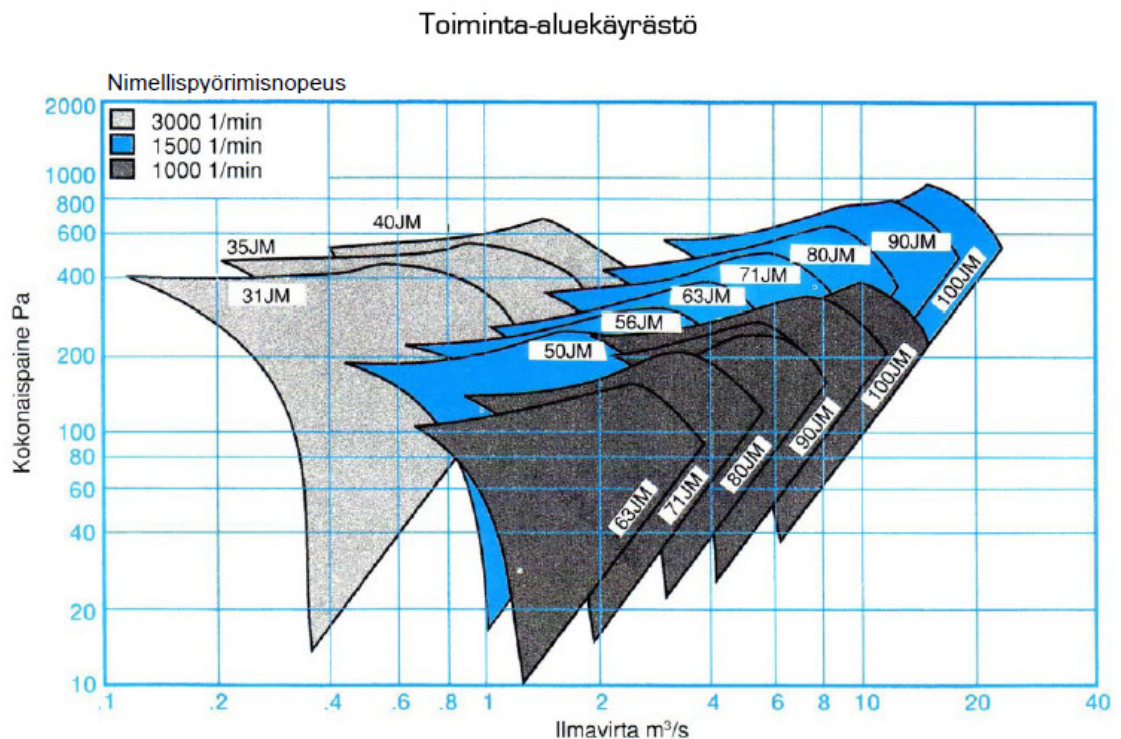
Taulukko 7. Savunpoistohormit

Laskentatapa	Vv [m ³ /s]	Kanavanopeus [m/s]	Ak (tarve) [m ²]	Kanavahalkaisija mm	Ak tot [m ²]	Kanavien lukumäärä [kpl]
Simulointi	13,90	15	0,927	1250	1,227	0,76
RIL 232-2008	28,60	15	1,907	1250	1,227	1,55

9.3 Savunpoistopuhaltimet

Kauppakeskuksen osalta sovittiin paloviranomaisten kanssa savunpoistopuhaltimien luokituksiksi F400 (120). Työselityksessä mainittiin puhaltimien luokitus, jotta urakoitsija osaa hankinnoissaan ottaa huomioon sovitut raja-arvot. Samaa puhallinluokitusta käytettiin niin parkkihallin kuin liiketilojen savunpoistopuhaltimissa.

Liiketilasta poistettavan savukaasun tilavuusvirraksi laskettiin RIL 232-2008:n mukaan $28,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Liiketilaan varattiin alun perin arkkitehdin toimesta kaksi savunpoistohormia rakennuksen katolle (ks. kuva 8). Simuloinnin tuottamilla ilmamäärillä tarvittiin vain yksi hormi, joten kauppakeskuksen katolla tarvittiin myös yksi puhallin vähemmän. Liiketilasta lähtee kuvan 8 mukaisesti kaksi savunpoistokanavaa ($\text{Ø}1250$) kauppakeskuksen katolle, jos noudatetaan laskelmilla saatuja ilmamääriä. Puhaltimet suunniteltiin rakennuksen katolle sille tarkoitettuun pieneen koppirakennelmaan.



Kuva 22. Savunpoistopuhaltimien toiminta-alueet eräällä laitevalmistajalla [7, s. 6]

Kuvan 22 puhallinkäyrästä valittiin sopiva puhallin. Puhaltimet ovat mallia 100JM/31/4/9 (potkurin halkaisija 1000 mm:ä). Puhaltimen kokonaispainetuotto tilavuusvirtaamalla 13,9 m³/s on 500 Pa (1500 rpm).

Sähkötiedot:

- 100JM/31/4/9 **18,0 kW** (400V, 50 Hz, 3-vaihe)



Kuva 23. Savunpoistopuhallin [7, s. 1]

Savunpoistopuhaltimien yhteisilmavirta simulointitapauksessa oli 13,90 m³/s ja RIL 232-2008:n mukaan lasketussa tapauksessa 28,60 m³/s. Taulukossa 8 on esitetty valitut savunpoistopuhaltimet molemmissa tapauksissa. Puhaltimet ovat halkaisijaltaan 1 000 mm. Oleellisin ero oli puhaltimien määrässä: simulointi 1 kpl ja laskenta 2 kpl. Simulointi vaati yhden savunpoistopuhaltimen, jonka painetuotto on 500 Pa, ilmamäärä 13,9 m³/s ja sähköteho 18,0 kW. RIL 232-2008:n mukaan savunpoisto vaati yhden savunpoistopuhaltimen enemmän eli kaksi puhallinta yhteensä. Puhaltimien painetuotto on 500 Pa, ilmamäärä 14,3 m³/s ja sähköteho 18,0 kW. Molemmissa tapauksissa käytettiin samaa puhallinta, mutta laskennan ilmamäärällä puhallin pyöri hieman nopeampaa.

Taulukko 8. Savunpoistopuhaltimet

Laskentatapa	Vv	Puhallintyyppi	Painetuotto	Ilmavirta	Teho	Puhaltimien määrä
	[m ³ /s]	[-]	[Pa]	[m ³ /s]	[kW]	[kpl]
Simulointi	13,90	100JM/31/4/9	500	13,9	9,0	1,00
RIL 232-2008	28,60	100JM/31/4/9	500	14,3	18,0	2,00

9.4 Korvausilma-aukot

Simulointitapauksessa:

Taulukossa 9 on esitetty korvausilma-aukkojen pinta-alarve kun sallittu nopeus aukon kohdalla on 5 m/s. Simuloinnissa saatiin korvausilma-aukkojen yhteen lasketuksi pinta-alaksi 2,78 m². Liiketilän korvausilma-aukkoina toimivat atriumtilaan johtavat liukuovet, joista ilma kulkeutuu käytävän kautta liiketilaan. Korvausilma-aukkojen pinta-ala on riittävä, sillä atriumtilaan aukeavien liukuovien yhteen laskettu pinta-ala on ainakin 22 m².

RIL 232-2008 mukaan laskettuna:

Savukaasun tilavuusvirraksi laskettiin 28,60 m³/s. Korvausilma-aukkojen ja savukaasun tilavuusvirran avulla tarkasteltiin ilmavirran enimmäisnopeutta aukossa. Laskennassa saatiin korvausilma-aukkojen yhteen lasketuksi pinta-alaksi 5,72 m². Liiketilän korvausilma-aukkoina toimivat atriumtilaan johtavat liukuovet, joista ilma kulkeutuu käytävän kautta liiketilaan. Korvausilma-aukkojen pinta-ala on riittävä, sillä atriumtilaan aukeavien liukuovien yhteen laskettu pinta-ala on ainakin 22 m².

Taulukko 9. Korvausilma-aukot

Laskentatapa	Vv	Nopeus	Korvausilma-aukko
	[m ³ /s]	[m/s]	[m ²]
Simulointi	13,90	5	2,780
RIL 232-2008	28,60	5	5,720

10 Hintavertailu

Hintavertailussa huomioitiin LVI-tekniset tarvikkeet ja laitteet, kuten savunpoistokanavat, savunpoistopuhaltimet ja savukaasupellit. Simuloinnilla saatujen ilmamäärien perusteella savunpoistolaitteille lasketut kustannukset olivat 26 504 €, kun taas vastaavat kustannukset RIL 232-2008:lla laskettuna olivat 53 008 €. Simuloinnilla savunpoistolaitteiston hinta-arvio oli 50,0 % pienempi. Taulukossa 10 on eritelty laskentatapojen mukaan saadut kustannukset.

Taulukko 10. Savunpoistolaitteiden kustannukset LVI-laitteiden osalta (ALV 0 %)

	Simulointi			RIL 232-2008		
	määrä	hinta 'a	YHT	määrä	hinta 'a	YHT
	[m tai kpl]	[€]	[€]	[m tai kpl]	[€]	[€]
Savunpoistokanavat						
1000x800	10	400	4000	20	400	8000
Ø1250	20	341	6820	40	341	13640
Käyrät Ø1250	2	1152	2304	4	1152	4608
Savunpoistopuhaltimet	1	12080	12080	2	12080	24160
Savukaasupellit	1	1300	1300	2	1300	2600
YHT			26504			53008

11 Loppupäätelmä

Simuloinnin ja palotehoon perustuvalla laskemisella oli huomattava ero lopputuloksia ajatellen. Huomattavin ero oli savunpoiston ilmamäärässä, joka oli savunpoiston laitteiston mitoittamisen kannalta oleellinen tekijä. Ilmamäärä saneli kanavakoot, puhallinkoot ja korvausilma-aukkojen pinta-alarpeet.

Esimerkkinä käytetyssä liiketilassa simuloitu ilmamäärä oli 13,90 m³/s ja vakiopalotehoon perustuvalla laskemisella laskettu ilmamäärä oli 28,60 m³/s. Simuloinnin ilmamäärä oli 106 % pienempi kuin savunpoiston suunnitteluohjeella laskettu ilmamäärä. Tämä poiki samassa suhteessa pienempiä korvausilmaluukkuja, mikä tarkoitti sitä, että liukuovien valoaukot liiketilan korvausilmareitillä olivat riittävät.

Pienemmät ilmamäärät johtivat luonnollisesti pienempiin kanavakokoihin niin liiketiloissa kuin katolle menevissä taloteknisissä kuiluissa. Liiketilojen osalta tämä tekijä oli merkittävä, sillä ratkaisulla saatiin liiketiloihin lisää tehokasta myyntitilaa. Lisäksi kahdella eri mitoituksella toteutetun savunpoiston laite- ja materiaalikustannukset poikkesivat toisistaan merkittävästi:

- Simuloinnilla toteutetun savunpoistolaitteiston hinta-arvio oli 26 504 €.
- Vakiopalotehoon perustuvalla laskennalla savunpoistolaitteiston hinta-arvio oli 53 008 €.

Tulokset antoivat hieman vääristyvän kuvan savunpoiston ilmamäärälaskelmissa, sillä lähtöarvojen käytössä simuloinnin ja laskennan välillä oli hieman eroja. Simuloinnissa käytettiin liiketilan osalta savuttomana minimikorkeutena 2 m:ä, kun vakiopalotehoon perustuvassa laskennassa vastaavana minimikorkeutena käytettiin 3 m:ä. Käytännössä tämä tarkoitti vähemmän tehokkaan savunpoiston tarvetta simuloinnin tapauksessa, sillä savupatjan paksuus katon rajassa sai olla yhden metrin paksumpi. Lisäksi lattianeliölle kohdistuvaa palotehoa ei mainittu simuloinnissa.

Tämä johti siihen, että vakiopaloteholaskelmissa käytetty palotiheys 650 kW/m^2 saattoi olla simulointiin nähden korkeampi ja näin ollen tulokset eivät olleet aivan vertailukelpoisia. Tosin kirjassa RIL 232-2008 Rakennusten paloturvallisuusoppaassa todetaan, että käytetään taulukkoarvoa 650 kW/m^2 jos tarvittavia lähtötietoja ei ole käytössä.

Tilaajan kannalta simulointi on harkittava vaihtoehto, mutta tulee muistaa, että vakiopalotehoon perustuvassa mitoituksessa voi yhtä lailla käyttää samoja lähtöarvoja kuin simuloinnissa. Vertailuksi laskettiin savunpoiston ilmamäärä palosimuloinnin kanssa samalla savuttomalla minimikorkeudella, mutta huomattiin mitoittavan ilmamäärän pysyvän muuttumattomana. Simuloinnissa tulee kuitenkin vertailtaessa huomioida savuttoman minimikorkeuden lisäksi palotiheytenä käytetty teho, jotta vakiopalotehoon perustuva laskelma ja simulointi ovat paremmin verrattavissa.

Lähteet

1. Kallioniemi, Pekka, RIL 232-2008 Rakennusten paloturvallisuus. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Hansaprint Oy, 2008.
2. Korhonen, Arto. Savunpoisto rakennuksista. (WWW-dokumentti.) <http://www.tkk.fi/Yksikot/Talo/opetus/Patuper/2005/Seminaarit/AK/Rakennusten_savunpoistojarjestelmat.pdf>. Päivitetty 25.04.2005. Luettu 28.11.2008.
3. Lankinen, Juha & Högman Teppo. Smoke Master SMIA. (DVD-videoleike). FläktWoods, 2008.
4. Ahtiainen, Lasse. LVI-insinööri. Tuomi Yhtiöt Oy. Haastattelu, 01.12.2008.
5. Kontkanen, Antti. Suljetun autopaikoitustilan ilmanvaihto ja savunpoisto suuntapainepuhaltimilla. (WWW-dokumentti.) <<http://www.flaktwoods.fi/220/7304/3/8639526c-7bb4-492c-842f-b44f0e731b18>>. Päivitetty 07.05.2008. Luettu 14.12.2008.
6. Hautala, Mikko & Peltonen, Hannu. Insinöörin (AMK) fysiikka osa 1. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy, 2003.
7. Fläktwoods. JM HT-sarjan savunpoistopuhaltimet 50 Hz. (WWW-dokumentti.) <<http://www.flaktwoods.fi/184/0/3/fa810955-38c6-47f5-b829-96f7864fb249>>. Julkaisuaikajankohta tuntematon. Luettu 25.01.2009.
8. Standardi SFS-EN 12101-3. Savunhallintajärjestelmä. Osa 3: Savunpoistopuhaltimet. Suomenkielinen käännös 06.09.2004 teoksesta EN 12101-3 Smoke and heat control systems. Part 3 Specification for powered smoke and heat exhaust ventilators. Suomen standardisoimisliitto SFS, 09.03.2001.
9. Helsingin kaupungin rakennusvirasto. LVI-SELOSTUSRUNKO. Helsinki: Helsingin kaupungin rakennusvirasto 09.11.2006
10. Hämäläinen, Sami. Alustavat simulointitulokset ja poistumisaikalaskelma. Helsinki: L2 Paloturvallisuus Oy, 29.01.2009.
11. Hämäläinen, Sami. Oletettuun palonkehitykseen perustuvan palosimuloinnin raportti. Helsinki: L2 Paloturvallisuus Oy, 12.02.2009.
12. Hämäläinen, Sami. Poistumisaikavideo 1K-F. (avi-videoleike.) Helsinki: L2 Paloturvallisuus Oy, 19.02.2009.

13. Kallioniemi, Pekka. Savunpoisto RIL 232-2008–laskentaohjelma. (excel-tiedosto.)
Espoo: Inspecta Oy, 26.03.2009.
14. Tuomi Yhtiöt Oy kotisivut. (WWW-dokumentti.)
<<http://www.tuomi.com/yritysesittely.htm>>. Päivitetty 07.05.2008.
Luettu 05.05.2009.