



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Sami Niemi

Kalliopysäköintitilan ilmanlaatututkimus sekä ilmanvaihto ja savunpoisto

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

26.4.2021

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Sami Niemi Kalliopysäköintitilan ilmanlaatututkimus sekä ilmanvaihto ja savunpoisto 38 sivua + 1 liite 26.4.2021
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Ammatillinen pääaine	LVI-suunnittelu
Ohjaajat	kehitysjohtaja Timo Svahn yliopettaja Rauno Holopainen
<p>Insinööriyössä tutkittiin kalliopysäköintilaitosten ilmanlaatua sekä niiden ilmanvaihto- ja savunpoistoratkaisuja. Tavoitteena oli selvittää ilmanlaadun pysyvyys Keilaniemeen rakennettavan pysäköintilaitoksen yli 600 metriä pitkässä pysäköintihallissa. Myös sähköautoilun yleistymisen ja siitä seuraavan sähköajoneuvojen latauspisteiden lisääntymisen vaikutuksia maanalaisten tilojen paloturvallisuuteen haluttiin tutkia tarkemmin.</p> <p>Aluksi kerättiin laaja tietopohja maanalaisten pysäköintilaitosten ilmanvaihdon ja savunpoiston teknisistä toteutusvaihtoehdoista ja mitoituksesta sekä liikenteen sähköistymisestä ja paloturvallisuudesta. Tähän hyödynnettiin runsaasti eri kirjallisuuslähteitä ja asiantuntija-haastatteluja. Tämän pohjalta tehtiin Keilaniemen kalliopysäköintilaitoksen ilmanlaatututkimus ja ilmanvaihdon mitoitus epäpuhtauspitoisuuden perusteella. Laskenta toteutettiin moniväyhykemallina, jossa pysäköintihalli jaettiin kymmeneen osaan. Näin voitiin arvioida hallin epäpuhtauspitoisuus sen eri osissa.</p> <p>Pysäköintihallin hiilimonoksidi- eli häkäpitoisuuden tulee pysyä kriittisimmäksi arvioituna käyttötuntina alle 35 mg/m^3. Ulkoilmavirralla määritelty pinta-alaperusteinen mitoitusarvo $2,7 \text{ l/s/m}^2$ eli noin $29,8 \text{ m}^3/\text{s}$ osoittautui laskelmissa riittäväksi, jopa ylivoimavaksi. Mitoittavan tunnin ajoneuvojen tuottaman epäpuhtauskuormituksen pohjalta pysäköintitilan optimaaliseksi ulkoilmavirraksi saatiin noin $2,3 \text{ l/s/m}^2$ eli noin $24,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Tällä mitoittavalla ulkoilmavirran enimmäistarve on 17 % pienempi kuin pinta-alaperusteisesti laskettu arvo.</p> <p>Kokonaisuudessaan työssä onnistuttiin hyvin täyttämään sille asetetut tavoitteet. Myös sähköajoneuvoista ja niiden paloturvallisuudesta saatiin kerättyä ilmanvaihto- ja savunpoistosuunnittelua hyödyttävää tietoa. Keilaniemen kalliopysäköintilaitoksen ilmanlaatututkimus suunniteltiin ja toteutettiin onnistuneesti, ja sen tutkimustietoa työn toimeksiantaja Ramboll pystyy hyödyntämään rakennushankkeen edetessä.</p>	
Avainsanat	kalliosuoja, ilmanlaatu, ilmanvaihto, savunpoisto, sähköautot

Author Title Number of Pages Date	Sami Niemi Air Quality, Ventilation and Smoke Extraction in Underground Parking Garages 38 pages + 1 appendix 26 April 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Professional Major	HVAC design
Instructors	Timo Svahn, Development Lead Rauno Holopainen, Principal Lecturer
<p>This Bachelor's thesis aimed at establishing the stability of air quality in an over 600-meter long underground parking facility planned for Keilaniemi in Espoo by studying its ventilation and smoke extraction. Furthermore, the consequences of the increasing number of electric vehicles and their charging stations to fire safety in underground spaces were studied.</p> <p>An extensive information base about the technical implementation options and sizing of ventilation and smoke extraction in underground car parks, as well as traffic electrification and fire safety was collected from literature and expert interviews. With the information, the air quality of the parking facility was simulated and the ventilation was dimensioned on the basis of the impurity concentrations. The simulation was executed as a multi-zone model with the garage divided into ten parts to better illustrate the accumulation of contaminants throughout the parts.</p> <p>The calculations based on the pollutant load produced by the vehicles showed that an optimal air flow allowed for a reduction in the airflow by up to 17 %. The thesis resulted in beneficial information for ventilation and smoke extraction planning, as well as about electric vehicles and their fire safety. The data from the air quality study will be used as the construction project progresses.</p>	
Keywords	underground, air quality, smoke extraction, electric cars

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Kalliotilojen ilmanvaihto- ja savunpoistoratkaisut	2
2.1	Ilmanvaihto	2
2.1.1	Suuntapainepuhallinjärjestelmä	3
2.1.2	Suutinkanavajärjestelmä	4
2.1.3	Tulo- ja poistoilmakanavajärjestelmä	4
2.1.4	Mitoitus	5
2.2	Ilmanvaihdon erityispiirteet	6
2.2.1	Kosteuden hallinta	7
2.2.2	Lämpöhäviöt	7
2.2.3	Kalliorakenteen tasaava vaikutus	8
2.3	Savunpoisto	8
2.3.1	Mitoitus	10
2.3.2	Palotilanne	11
2.3.3	Automaattisen sammutusjärjestelmän kohteet	13
3	Liikenteen sähköistymisen vaikutukset	15
3.1	Sähkökäyttöisten autojen paloturvallisuus	15
3.2	Maanalaiset pysäköintitilat	17
3.2.1	Sähköautopalo	17
3.2.2	Latauspisteet ja latauspistevalmiudet	18
4	Case: Keilaniemen kalliopysäköintilaitos	20
4.1	Ilmanvaihtoratkaisu ja ilmanlaatu	21
4.2	Ilmanlaatututkimuksen lähtökohdat	22
4.2.1	Epäpuhtauskuormituksen laskeminen	24
4.2.2	Ilmanvaihdon mitoitus epäpuhtauskuormituksen perusteella	28
5	Yhteenveto ja pohdinta	34
	Lähteet	36

Liitteet

Liite 1. Moottoriajoneuvosuojan ilmanvaihdon mitoitus epäpuhtauspitoisuuden mukaan

1 Johdanto

Opinnäytetyön tilaajana toimii suunnittelu- ja konsulttialan yritys Ramboll Finland Oy, jossa myös itse työskentelen. Työn aiheena on kalliopysäköintitilan ilmanlaatu sekä ilmanvaihto- ja savunpoistoratkaisut. Päättökysymyksenä on ilmanlaadun säilyvyys Keilaniemeen rakennettavassa pysäköintilaitoksessa. Tämän lisäksi selvitetään kalliopysäköintilaitosten ilmanvaihdon ja savunpoiston eri tekniset ratkaisut ja niiden mitoitus. Samassa yhteydessä otetaan kantaa lisääntyvään autokannan sähköistymiseen ja tämän vaikutuksista paloturvallisuuteen.

Päälähteinäni käytän suomen- ja englanninkielisiä tietokokoelmia, standardeja ja tutkimustietoa, niin kirjallisessa kuin sähköisessäkin muodossa. Lisäksi olen yhteydessä alan asiantuntijoihin. Ramboll on ollut ja on parhaillaan osana monen eri kalliopysäköintilaitoksen suunnittelua, jonka vuoksi yrityksen sisältä löytyy paljon esimerkkitapauksia ja asiantuntemusta aiheeseen liittyen. Tätä osaamista ja dataa hyödynnän omassa tutkimuksessani.

Aluksi kartoitan kalliotilojen eri ilmanvaihto- ja savunpoistoratkaisut sekä näiden mahdollista erityishuomiota vaativat kohdat. Viime vuosien sähköautojen käytön yleistymisen odotetaan tulevaisuudessa kiihtyvän entisestään. Haluan selvittää, mitä vaikutuksia tällä on kalliosuojien ja pysäköintilaitosten paloturvallisuuteen ja ilmanvaihtoratkaisuihin ja miten tähän on pelastuslaitosten puolelta varauduttu. Lähteinä hyödynnän sähköisiä artikkeleja ja tutkimustietoa, joiden lisäksi olen yhteydessä Helsingin pelastuslaitokseen.

Tutkimuksen yksi pääkohta on selvittää sisäilman laadun riittävyys pitkissä pysäköintihalleissa, joissa ilmaa siirretään useita satoja metrejä. Case-tapauksena toimii suunnitella oleva suuri Keilaniemen kalliopysäköintilaitos, johon tällä insinööriyöllä on tarkoitus tuottaa tutkimustietoa. Selvitetään paras tapa tutkia ilman epäpuhtauspitoisuuksien kasvua hallin matkalla ja tehdään tämän pohjalta laskelmat.

2 Kalliotilojen ilmanvaihto- ja savunpoistoratkaisut

Rakentaminen ja suunnittelu painottuvat yhteiskunnan kasvaessa entistä enemmän maanalaisiin tiloihin. Niiden rakentaminen edellyttää lähes aina koneistettua talotekniikkaa. Esimerkiksi ilmanvaihtoa ja savunpoistoa ei käytännössä voi toteuttaa paine-eroilla, jotka saadaan aikaan sisä- ja ulkoilman välisillä tiheyseroilla ja tuulenpaineella. Myös pelastusjärjestelyihin ja paloturvallisuuteen on kiinnitettävä enemmän huomiota kuin maanpäällisessä rakentamisessa. Maanalaisen ja maanpäällisen rakentamisen yhteensovittaminen voi myös tietyissä tapauksissa osoittautua haastavaksi ja kalliiksi. (Lampi 2017: 137.)

Keskittetyt pysäköintiratkaisut ovat tiiviissä kaupunkiympäristössä tehokas tapa ratkaista pysäköintiä tulevaisuudessa. Maanalaisten pysäköintilaitosten avulla voidaan myös parantaa kaupunkiympäristön viihtyisyyttä ja turvallisuutta. Niiden myötä ajoneuvoliikenne tonttikaduilla vähenee, mikä lisää jalankulkijoiden ja pyöräilijöiden turvallisuutta sekä parantaa paikallisesti myös lähialueen ilmanlaatua. (Keilaniemeen suunnitellaan kallio-pysäköintilaitosta 2020.)

2.1 Ilmanvaihto

Maanalaiset tilat vaativat koneellisen ilmanvaihtojärjestelmän, jonka valinnan perusteena tulee olla tilan asettamien vaatimusten mukainen laatutaso (Kalliotilat). Pysäköintilaitoksen ilmanvaihto tulee mitoittaa siten, että ilma sekoittuu riittävästi joka osassa tilaa, jottei ilman epäpuhtauspitoisuus nouse liian korkeaksi ja aiheuta terveydellistä haittaa tilassa oleskeleville. Tiettyjen ruuhkakohtien, kuten jonotus- tai pysäköintimaksupaikkojen ilmanvaihtoa voidaan tehostaa sijoittamalla lisäpoistoja näihin kohtiin. Tehostettu poisto voi toimia esimerkiksi CO- eli häkäpitoisuuden mukaan ohjatusti. (Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto 2012.)

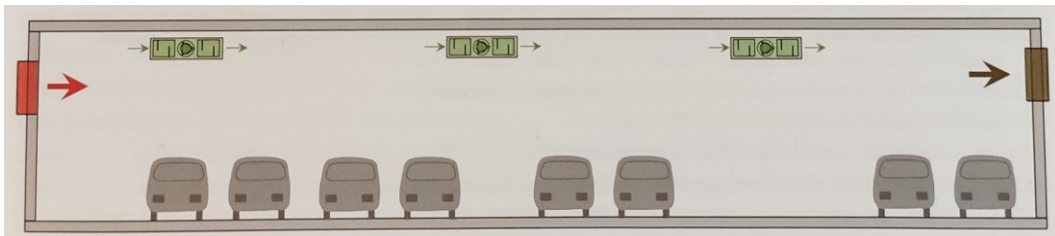
Ilmanvaihdon järjestämiseksi kalliotiloissa tarvitaan sekä tulo- että poistoilmanvaihtokuilut ulkoilmaan. Energiategokkuuden ja kosteudenhallinnan kannalta on järkevää ottaa poistoilmassa olevaa lämpöä talteen ja siirtää tuloilman lämmitykseen, sillä ulkoilmakuilu

on altis jäätymiselle kylmän ja kostean ulkoilman vaikutuksesta (Kalliotilojen ilmastointilaitosten käyttöohje 1997: 12). Esimerkiksi Katajanokan kalliopysäköintilaitoksessa vierekkäisten kahden hallin ilmanvaihdon lämmöntalteenotto on yhdistetty, jolloin molempien hallien poistoilmasta saadaan lämpöä siirrettyä tuloilmaan (Katajanokan pysäköintilaitos 2014). Tarvittaessa ilmanvaihdossa tulee huomioida myös radonkaasun poistaminen. Eri käyttöaikojen tilat on suositeltavaa varustaa omilla ilmanvaihtokoneilla, jotta saavutetaan mahdollisimman hyvä sisäolosuhteiden hallinta ja energiatehokkuus. Jos tiloja käytetään myös väestösuojana, se ei saa huonontaa normaaliajan ilmastoinnin laatutasoa. Ajotunneleiden, jotka yhdistävät maanalaisen kalliotilan ulkoilmaan, ilmanvaihto mitoitetaan ja järjestetään erikseen. Tekniset tilat, porrastilat ja poistumistiet varustetaan omilla ilmanvaihtokoneillaan ja kanavoinnillaan. (Kalliotilat 1998.)

2.1.1 Suuntapainepuhallinjärjestelmä

Ensimmäinen suuri kohde, jossa suuntapainepuhaltimia hyödynnettiin kalliotilojen ilmanvaihdossa, on vuonna 2009 avattu Prisma Itäkeskus. Nykyään maanalaisten pysäköintitilojen ilmanvaihto toteutetaan yhä useammin suuntapainepuhaltimien avulla. Tällöin vältetään pitkiltä kanavavedoilta suurissa kalliotiloissa ja voidaan hyödyntää samaa järjestelmää savunpoistossa ja optimoidaan myös energiankäyttöä. (Kontkanen 2021.)

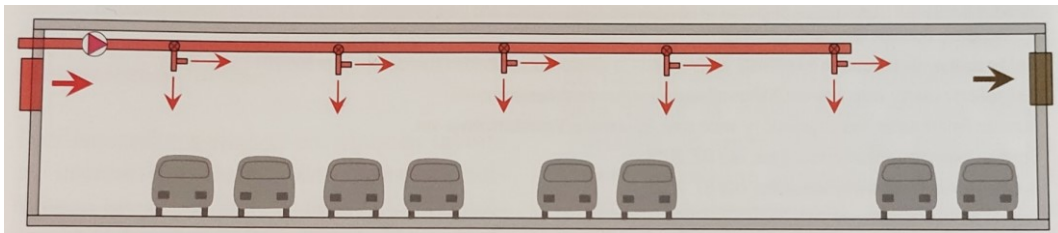
Järjestelmässä ulkoilma tuodaan kuilua pitkin maan alle, josta se tuloilmalaitteesta puhalletaan pysäköintitilaan. Siitä se johdetaan impulssi- eli suuntapainepuhaltimien avulla kuvan 1 mukaisesti koko tilan läpi poistoilmalaitteelle. Minimi-ilmanvaihtotilanteessa suuntapainepuhaltimet voivat olla kokonaan pois päältä. Ilmanvaihtotarpeen kasvaessa puhaltimia ohjataan ilman epäpuhtausantureiden avulla. Kontkasen (2021) mukaan puhaltimet tulee ajatella päälle/pois-tyyppisinä, joten optimaalinen tehonsäätö tehdään käytössä olevien puhaltimien määrää muuttamalla eikä esimerkiksi taajuusmuuttajan avulla.



Kuva 1. Periaatekuva suuntapainepuhallinjärjestelmästä (Sandberg 2014a: 533).

2.1.2 Suutinkanavajärjestelmä

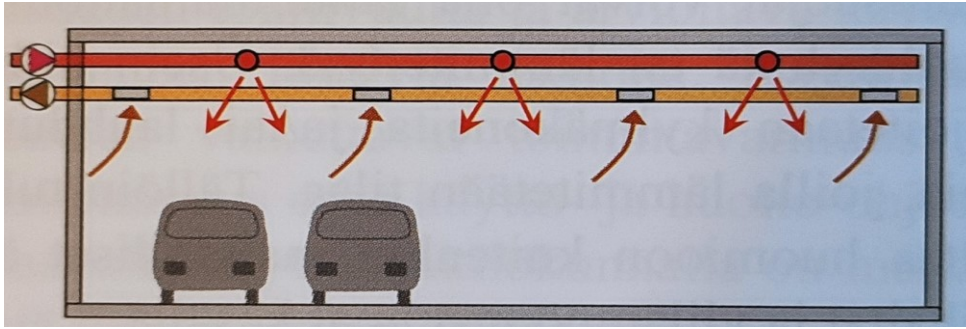
Toinen suuremmissa pysäköintitiloissa käytetty ilmanvaihtojärjestelmä on suutinkanava-perusteinen Dirivent-järjestelmä (kuva 2). Siinä päätuloilmaa tuodaan suuntapainejärjestelmän tavoin pysäköintitilan toisesta päästä säleiköillä ja likaantunut ilma poistetaan tilan vastakkaisesta päästä poistoilmalaitteella. Tämän lisäksi ilmaa kuljettaa suutinkanavistosta puhallettu tuloilmasuihku, joka sekoittuu nopeasti ympäröivään ilmaan. (Sandberg 2014a: 533.)



Kuva 2. Periaatekuva suutinkanavajärjestelmästä (Sandberg 2014a: 533).

2.1.3 Tulo- ja poistoilmakanavajärjestelmä

Maanalaisten pysäköintitilojen ilmanvaihto voidaan toteuttaa myös ilmanvaihtokanaviston avulla, jolloin tulo- ja poistoilma johdetaan pysäköintitilaan perinteisesti kanavistoa pitkin kuvan 3 mukaisesti. Tätä käytetään pääosin pienissä pysäköintitiloissa, sillä suuremmissa tiloissa, joissa käytetään ilman epäpuhtauksiin perustuvaa tarpeen mukaista ilmanvaihtoa, järjestelmä voi aiheuttaa haasteita automaatiojärjestelmän optimaaliselle toiminnalle ja ilmavirtojen tehokkaalle hallinnalle. Kanavoitu järjestelmä voi myös johtaa haasteellisiin tilanvarauksiin ja suuriin kanavakokoihin. (Sandberg 2014a: 533.) Toisaalta kanavoidulla järjestelmällä voidaan saavuttaa paremmin hallittavat ilmanlaatuolosuhteet. Suurempi ilmanvaihtokanavistolla toteutettu tila on esimerkiksi Töölön kallio-pysäköintilaitos.



Kuva 3. Periaatekuva tulo- ja poistoilmakanavajärjestelmästä (Sandberg 2014a: 532).

2.1.4 Mitoitus

Kalliopysäköintilaitoksen ilmanvaihto tulisi mitoittaa kriittisimmän ennakoitavissa olevan käyttötilanteen mukaan. Lisäksi mitoituslaskelmiin suositellaan lisäämään tarvittava varmuusvara, sillä ilman laadun epäpuhtauksien muodostumista on erittäin hankala etukäteen tarkkaan ennustaa. Pakokaasuista aiheutuviin epäpuhtauspitoisuuksiin vaikuttavat lukuisat eri seikat, kuten ajoneuvojen määrä, käyttövoima, ajonopeus, ajomatka, käynnistyslämpötila, tyhjäkäyntiaika ja niiden mahdollisesti aiheuttama ruuhkautuminen. Pitkien katettujen ajoramppien ja ajotunneleiden ilmanvaihto tulee mitoittaa kuten tietunnelit. (Moottoriajoneuvosuojan ilmanvaihdon mitoitusopas 2018.) Paikoitustilojen tulee olla ympäröiviin tiloihin nähden alipaineisia. Lisäksi on tärkeää varmistua ilman vaihtuvuudesta joka puolella rakennusta, jottei ei-toivottuja paikallisia pyörrevirtauksia, joissa ilma ei pääse vaihtumaan, esiinny (Sandberg 2014a: 531).

Ilmanvaihdon mitoituksen määrittää ajoneuvojen pakokaasupäästöistä sisäilmaan tulevat epäpuhtaudet. Lähtökohtaisesti mitoituksessa käytetään häkä- eli hiilimonoksidipitoisuutta (CO-pitoisuus), sillä se on epäpuhtauksista merkittävin määränsä ja haitallisuutensa vuoksi. Sen oletetaan myös tarpeeksi hyvin vastaavan muiden epäpuhtauksien määrää. Laskelmissa hiilimonoksidipitoisuuteen eniten vaikuttava tekijä on mitoittavan tunnin aikana tehtyjen käynnistysten määrä. Muita merkittäviä muuttujia ovat esimerkiksi halliin sisään- ja ulosajot sekä tyhjäkäynnit. Epäpuhtauskuormaan perustuvassa mitoituksessa (kaava 1) ilmanvaihto on mitoittettava siten, että moottoriajoneuvosuojassa hiilimonoksidin keskiarvopitoisuus ei ole korkeampi kuin 35 mg/m^3 (30 ppm) kriittisimmäksi arvioituna käyttötuntina. Jatkuvan työskentelyalueen ilmavirrat mitoitetaan niin, että hiili-

monoksidin hetkellinen pitoisuus ei ylitä 7 mg/m^3 (6 ppm). (Moottoriajoneuvosuojaan ilmanvaihdon mitoitusopas 2018.) Paikoitustilaan tulee sijoittaa 1,7 metrin korkeudelle vähintään 3 kpl mittausantureita jokaista kerrosta kohti. Sijainti ja määrä päätetään tapauskohtaisesti, lähtökohtana sijainti ajoreittien läheisyydessä. Antureilta tuleva tieto ohjaa puhaltimien käyttöä ja raja-arvon ylityessä aiheuttaa hälytyksen. (Sandberg 2014a: 532.)

$$q_{poisto} = \frac{G}{C_{poisto} - C_{tulo}} \quad (1)$$

jossa

q_{poisto} on poistoilmavirta (l/s/m^2)

G on moottoriajoneuvosuojaan epäpuhtauskuormitus (mg/s)

C_{poisto} on poistoilman epäpuhtauspitoisuus (mg/m^3)

C_{tulo} on tuloilman epäpuhtauspitoisuus (mg/m^3).

Jos moottoriajoneuvosuojaan hiilimonoksidin mitoittavaa pitoisuusmäärää ei tunneta, mitoitetaan ilmanvaihto neliömetripohjaisilla vähimmäisarvoilla taulukon 1 mukaisesti (Moottoriajoneuvosuojaan ilmanvaihdon mitoitusopas 2018).

Taulukko 1. Moottoriajoneuvosuojaan pinta-alapohjaiset mitoitusvähimmäisarvot (Moottoriajoneuvosuojaan ilmanvaihdon mitoitusopas 2018).

Ajojen lukumäärä*	Ilmamäärä	Esimerkkikohde
1	$0,9 \text{ (dm}^3/\text{s)/m}^2$	asuintalojen paikoitustilat
2-4	$2,7 \text{ (dm}^3/\text{s)/m}^2$	toimisto- ja virastotilojen henkilökunnan paikoitustilat
$n \geq 4$	$n \times 0,9 \text{ (dm}^3/\text{s)/m}^2$	varsinaiset paikoitustalot sekä toimisto-, virasto- ja liikerakennusten asiakaspaikoitustilat

* tässä ajojen lukumäärällä tarkoitetaan ajojen määrää autopaikkaa kohden vuorokauden vilkkaimman 8 tunnin jakson aikana

2.2 Ilmanvaihdon erityispiirteet

Maanalaisilla kalliotiloilla ja autosuojilla on muutamia erityishuomiota vaativia kohtia, jotka on huomioitava niin suunnittelu- kuin käyttövaiheessakin. Kalliotiloissa korostuvat eritoten kosteuteen ja lämmitykseen liittyvät seikat. (Kalliotilojen ilmastointilaitosten käyttöohje 1997: 9.)

2.2.1 Kosteuden hallinta

Kosteus on kalliorakentamisen yksi suurimmista riskeistä ja erityishuomiota vaativista seikoista. Tämä on rakennusvaiheessa esimerkiksi pintamateriaaleja valittaessa aina otettava huomioon (Lampi 2017: 137). Maanalaisissa tiloissa kosteuden hallinta vaatii enemmän huomiota kuin maanpäällisissä tiloissa, koska suunnittelussa on otettava huomioon myös kallion ruiskubetonoidulta pinnalta haihtuva kosteus. Kosteudenhallinnan edellytyksiä saadaan parannettua, kun eri käyttötarkoituksen tilat varustetaan omilla ilmastointikoneilla. (Kalliotilat 1998.)

Kosteus ei ole vaaraksi itse vaipan rakenteella, mutta metallipinnat ja putkistot ovat herkkiä korroosiolle (Kalliotilojen ilmastointilaitosten käyttöohje 1997: 11). Tämän lisäksi kosteus saattaa aiheuttaa näkyvyyso ongelmia ja vaaratilanteita. Liian korkeaksi kohonnut sisäilman kosteus myös mahdollistaa autojen kylmien tuulilasien lyhytaikaista huurtumista (Moottoriajoneuvosuojan ilmanvaihdon mitoitusopas 2018). Ilmankosteuden ollessa korkealla, voi siitä olla haittaa palokunnan ja muun pelastushenkilökunnan toiminnalle sen hankaloittaessa näkyvyyttä pelastusolosuhteissa (Kalliotilat 1998).

Hankalin tilanne on kesäaikaan, kun ulkoilma on erityisen kostea. Tällöin esimerkiksi sisäänkäyntitunneleiden seinämällä saattaa esiintyä kondenssiveden aiheuttamia tippavuotoja (Kalliotilat 1998). Kalliopysäköintitiloissa ilmankosteuden raja-arvo saattaa olla esimerkiksi 75 %. Tällöin kesällä sisäänpuhallusilmaa on lähes välttämätöntä kuivata. Kuivausprosessin aikana syntyvä yllämpö voidaan johtaa lämmittämään pysäköintitilaa, mikä myös itsessään lisäksi vähentää ilman kuivaustarvetta. (Kalliotilojen ilmastointilaitosten käyttöohje 1997: 11.) Kalliotilan mahdollisilla ilmanvaihdon katvealueilla saattaa ajan kuluessa esiintyä kosteuden ja korroosion ongelmia. Kun ilman suhteellinen kosteus kasvaa yli 70 %:iin, alkaa sieneliöiden ja homeen esiintyvyys lisääntyä. Toisaalta, kun ilmankosteus saadaan laskettua alle 50 %:iin, teräksen korroosio pysähtyy käytännössä kokonaan. (Kalliotilat 1998.)

2.2.2 Lämpöhäviöt

Kalliotiloissa ulkoilman lämpötila ei vaikuta vaipan lämpöhäviöihin, mikäli kallion paksuus on riittävän suuri. Yli 15 metrin syvyydessä olevan kalliotilan lämpöhäviö tasoittuu en-

simmäisten viiden vuoden jälkeen keskimäärin arvoon 4,4 W/m². Toisaalta ulkoilma alkaa vaikuttamaan merkittävästi, kun kallion katto on alle 10 metrin paksuinen. Vaipan paksuuden ollessa 6 metriä asettuu lämpöhäviöluku arvoon n. 7,8 W/m² eli jopa 80 % vertailuarvoa korkeammaksi. (Kalliotilojen ilmastointilaitosten käyttöohje 1997: 9–10.)

Kalliotiloja suunnitellessa ja rakennettaessa on tärkeää myös kiinnittää huomiota tilojen ensimmäisten parin vuoden ns. alkulämmitykseen. Jos otetaan tarkasteluun 15 metriä paksu kalliovaippa, vaatii kahden ensimmäisen vuoden lämpöhäviöiden kompensoiminen vuositasolla keskimäärin kaksi kertaa enemmän energiaa kuin viiden vuoden päästä lämpöhäviöiden tasaannuttua. Tilojen lämmitysteho voidaan mitoittaa vastaamaan varsinaisen käyttöajan tarvetta, kun alkulämmitys aloitetaan jo rakennusaikana. Tällöin lämmityslaitos saadaan toimimaan optimaalisesti lopputilanteessa. (Kalliotilojen ilmastointilaitosten käyttöohje 1997: 9–10.)

2.2.3 Kalliorakenteen tasaava vaikutus

Kallioperä toimii hyvänä lämpöenergian varastointimahdollisuutena. Tämä antaa mahdollisuuden kesäaikana säilöä lämpöenergiaa, joka purkautuu talvella kallioista ympäröivän tilan jäähtyessä hitaasti lämmittäen tilaa. Tällöin sisäänpuhallukseen voidaan käyttää alilämpöistä ilmaa. Kallion tasaava vaikutus antaa myös mahdollisuuden hetkellisesti pysäyttää ilmanvaihto käyttöajan ulkopuolella. Tämän ei ole todettu juurikaan vaikuttavan ilman lämpötilaan tai kosteuteen. (Kalliotilojen ilmastointilaitosten käyttöohje 1997: 10.) Kuitenkin tällöin täytyy huomioida, etteivät ilman epäpuhtauspitoisuudet ylitä raja-arvoja. Ilmanvaihto voidaan pitää pois päältä, kun sisäilman hiilimonoksidipitoisuus pysyy alle arvon 7 mg/m³ eli 6 ppm (Moottoriajoneuvosuojan ilmanvaihdon mitoitusopas 2018).

2.3 Savunpoisto

Savunpoiston päätarkoitus palon alussa on ihmisten poistumisen turvaaminen palavasta tilasta ja pelastushenkilökunnan toiminnan mahdollistaminen. Tulipalossa suurimman uhkan henkilöturvallisuudelle ja omaisuudelle aiheuttavat palokaasujen myrkyllisyys ja kuumuus, kuten myös noki ja nopean korroosion palamistuotteet. Asianmukaisesti suunniteltu ja huollettu savunpoistojärjestelmä voi merkittävästi vähentää palon aiheuttamia

henkilö- ja omaisuusvahinkoja. (Savunpoiston tarkoitus.) Sammutusvaiheen jälkeen tilasta tulee poistaa haitalliset savukaasut jälkivahinkojen välttämiseksi. Palokunnan nyrkisääntönä savutuuletukseen on, että tilan ilman täytyy vaihtua viisi kertaa savutuuletuksen aikana. (Rakennusten savunhallinta: suunnittelu, toteutus ja ylläpito 2020: 17, 79.)

Savun leviämistä rajoittavat rakenteet ovat rakennusten savun- ja palonhallinnan perusta. Osastoivat rakenteet estävät palon etenemisen määrätyn ajanjakson ajan. Sen sijaan savun leviämistä hidastaville savusuluilla on pienemmät tiiviys- ja palonkestävyysvaatimukset, jotka määräytyvät suojatun kohteen mukaan. Lähtökohtana ovat sulun rakojen enimmäiskoko ja savunläpäisevyyden maksimitaso. Savusulkuja käytetään yleisesti esimerkiksi suuntapainepuhaltimien kanssa. (Rakennusten savunhallinta: suunnittelu, toteutus ja ylläpito 2020: 20, 180.) Ne voivat olla kiinteästi asennettuja tai vaihtoehtoisesti siirrettäviä, kuten palon alkaessa alas laskeutuva verho. Niillä rajataan tila eri vyöhykkeisiin eli savulohkoihin sulkemalla esimerkiksi savulohkossa oleva aukko, käytävä tai liukuportaat. (Rakennusten savunhallinta ja savunpoistolaitteistojen kunnossapito 2019.) Kalliopysäköintilaitoksessa savulohkojako on tärkeä, sillä koko pysäköintitila saattaa olla samaa palo-osastoa (Katajanokan pysäköintilaitos 2014).

Savun hallinta ja sen hallittu poistaminen ovat maanalaisista tiloista huomattavasti haastavampaa maanpäällisiin tiloihin verrattuna. Poistumisvälimatkat ovat pitkiä ja savunpoisto vaatii pitkiä siirtymiä ja koneellisia savunpoistopuhaltimia. (Kalliotilojen ilmastointilaitosten käyttöohje 1997: 13.) Savunpoistojärjestelmä poistaa savua ja lämpöenergiaa palavasta kohteesta kuljettaen savukaasuja suunniteltua poistoreittiä pitkin ulkoilmaan ja samalla tuoden puhdasta korvausilmaa tilalle. Savunpoiston vaatimien suurten ilmavirtojen takia korvaus- ja poistoilmakuilujen poikkipinta-alat voivat kasvaa suuriksi. (Maanalaisten toimintojen yleinen turvallisuusselvitys 2016: 59.)

Suuntapainepuhallinlaitteiston muodostavat ilmaa tilassa siirtävät suuntapainepuhaltimet, savun leviämistä rajoittavat rakenteet, korvausilma- ja savunpoistopuhaltimet sekä mahdolliset kanavoinnit (Rakennusten savunhallinta: suunnittelu, toteutus ja ylläpito 2020: 24). Suuntapainepuhalluksella luodaan tilaan pelastushenkilökunnalle savuton hyökkäysreitti palon sammuttamiseksi ja pidetään kulkureitit savuttomina. Suuntapainepuhallus käynnistetään vasta kun ihmiset ovat poistuneet savulta täyttyvältä alueelta. Yksisuuntaisen liikenteen ajoneuvotunneleissa suuntapainepuhallusta on mahdollista

käyttää myös pelastautumiseen. Poistuminen tulee ohjata korvausilmaa vastaan savusta pois päin. (Rakennusten savunhallinta ja savunpoistolaitteistojen kunnossapito 2019.)

2.3.1 Mitoitus

Suuntapainepuhallukseen perustuvaa savunpoistojärjestelmää käytetään lähinnä maanalaisissa tunneleissa ja autosuojissa, joissa matalasta tilasta halutaan suuria savumääriä poistamalla luoda palokunnalle sammutusreitit (Rakennusten savunhallinta: suunnittelu, toteutus ja ylläpito 2020: 149). Suuntapainepuhaltimet mitoitetaan yleensä niin, että ne käyvät puoliteholla normaalissa ilmanvaihtotilanteessa ja täydellä teholla savunpoiston aikana (Kontkanen 2021). Samaa laitteistoa ja puhaltimia voidaan siis käyttää sekä normaalin ilmanvaihdon että savunpoiston yhteydessä, kunhan huomioidaan savunpoistotilanteen korkeammat palonkestovaatimukset. Vastaavasti kun kanavoidussa järjestelmässä on yhdistettynä ilmanvaihto ja savunpoisto, tulee kanaviston ja laitteiden täyttää savunpoistolle asetetut laatu- ja kapasiteettivaatimukset. (Kalliotilojen ilmastointilaitosten käyttöohje 1997: 13.) Laitteiston yhteiskäyttö on yleensä taloudellisesti kannattavaa, mikäli mitoitusilmavirrat ovat samaa suuruusluokkaa. Toisaalta harkinnan mukaan on mahdollista myös rakentaa erilliset yleisilmanvaihto- ja savunpoistojärjestelmät (Sandberg 2014a: 533).

Tiloille määritellään savunpoistotasot suunnittelun ja toteutuksen helpottamiseksi. Tason 1 rakennusten savunpoistoa ei mitoiteta eikä jaeta savulohkoihin, vaan savunpoistossa käytetään normaaleja ikkunoita ja ovia. Tasolla 2 järjestelmän ensisijainen tehtävä on palokunnan sammutus- ja pelastustoiminnan tehostaminen. Käytössä on tarkempaan mitoitukseen perustuva savunpoistolaitteisto, jonka palokunta käynnistää. 3-tason kohteissa on automaattinen savunpoistolaitteisto, jonka pääasiallinen tehtävä on turvata palon alkuvaiheessa henkilöiden poistumisturvallisuus. (Rakennusten savunhallinta: suunnittelu, toteutus ja ylläpito 2020: 41–42, 69, 72–73.)

Kalliopysäköintilaitokset määritellään yleisesti savunpoistotasoon 2, ja erittäin suuret kalliosuojat tasoon 3. Vaativammalla 3-tasolla käytetään mitoituksena joko vakiopalotehoa, oletettua palokehitystä tai palosimulointia. 2-tason tiloissa savunpoisto mitoitetaan yleensä kaavaperusteisesti, jolloin savulohkon enimmäispinta-ala on 2 600 m². (Raken-

nusten savunhallinta: suunnittelu, toteutus ja ylläpito 2020: 68, 72.) Suuntapainepuhaltimia käyttävä savunpoistojärjestelmä mitoitetaan lähes aina CFD-mallinnuksen avulla, jolloin pystytään parhaiten huomioimaan tilan geometria ja varmistetaan järjestelmän toiminnasta eri tilanteissa (Sandberg 2014a: 533). Korvausilman ja savunpoiston ilmavirrat mitoitetaan suuntapainepuhaltimien ilmavirtatuoton mukaisiksi (Salmi 2020).

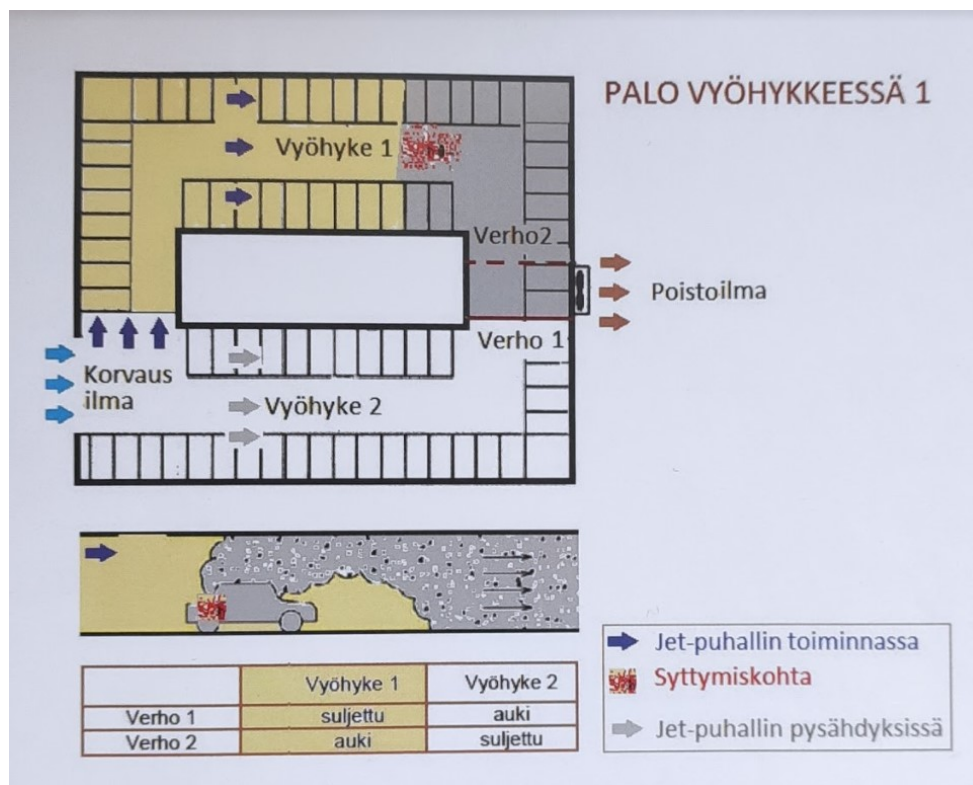
Savunpoiston mitoituksessa huomioon otetaan myös savunpoisto- ja paloluokat ja palokuormaryhmät. Tilat jaetaan näihin niiden käyttötarkoituksen ja palokuorman määrän perusteella. Pysäköintilaitokset kuuluvat palokuorman tiheydessä kolmiportaisen luokituksen (alle 600 MJ/m², 600–1 200 MJ/m² ja yli 1 200 MJ/m²) alimpaan ryhmään eli niissä vapautuu lämpöenergiaa palamisen aikana alle 600 MJ/m² (Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta). Savunpoistoluokat jaetaan neljään tasoon: SL1–SL4. Henkilöautojen kalliosuojien savunpoistoluokkana pidetään yleisesti luokkaa SL2, mutta jokainen mitoitettava kohde vaatii aina erillistarkastelun (Rakennusten savunhallinta: suunnittelu, toteutus ja ylläpito 2020: 49–50). Rakennuksen paloturvallisuuden varmistaminen lähtee aina kokonaisuuden hahmottamisesta. Huomioon tulee ottaa em. lisäksi neljäpykäläisen (P0–P4) paloluokituksen vaatimukset sekä kohdekohtaiset erityissuunnittelutarpeet ja esimerkiksi sähkönsyötön toteutustapa. (Suosalo 2021.)

2.3.2 Palotilanne

Kohteesta voi lähteä palohälytys automaattijärjestelmästä esimerkiksi lämmön nousun tai savun seurauksena, mahdollisesta sprinklerilaitteistosta tai manuaalisesti. Kohdekohtaisesti päätetään, millä tavoin savunpoistoa hallinnoidaan ja mikä taho sen käynnistää. Joissakin tapauksissa savunpoisto voi olla toteutettu automaattisena, esimerkiksi suurissa maanalaisissa kokoontumistiloissa (Suosalo 2021). Tällöin myös mahdollisten suuntapainepuhaltimien käynnistykseen tulee asettaa tietty viive, jotta varmistutaan etteivät ihmiset altistu niiden aikaansaamalle savun ja lämmön liikkeelle. Tämä viive on viranomaisten kanssa tapauskohtaisesti määritelty, siihen vaikuttavat muun muassa tilan muoto ja koko, puhaltimien määrä, poistumisteiden määrä sekä arvioitu henkilölukumäärä. (Components for smoke and heat control systems 2006: 18–19.) Automaattinen savunpoisto on usein haasteellisempi toteuttaa ja monen suunnittelutekijän summa, joten valtaosassa tapauksista savunpoisto käynnistetään manuaalisesti, jolloin pystytään

paremmin hallitsemaan kokonaistilannetta. Usein siitä vastaa paikalle saapuva palokunta, joissakin tietyissä tapauksissa joku muu taho, esimerkiksi maantietunneleiden osalta alueen tieliikennekeskus. (Suosalo 2021.)

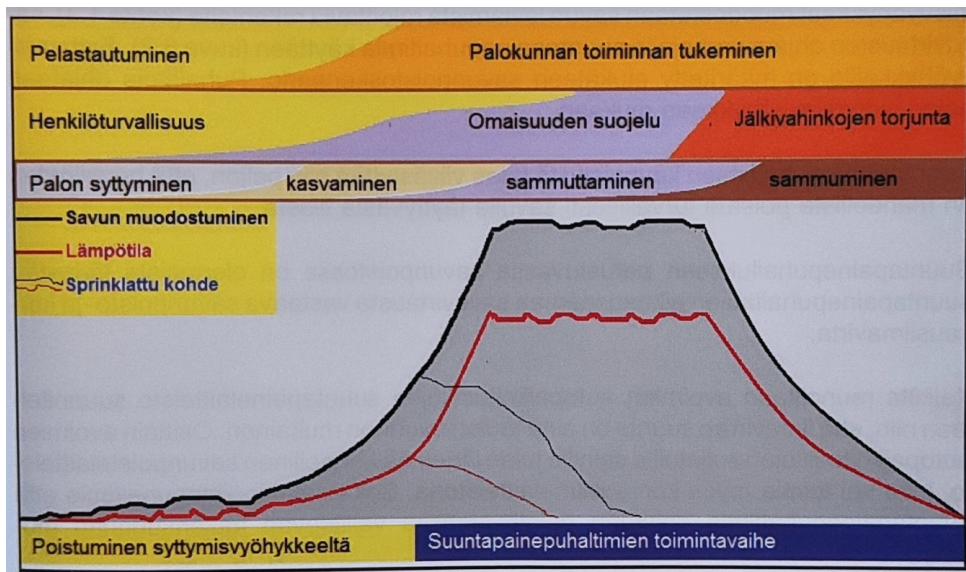
Palotilanteessa savunpoiston suuntapaine- ja erillispuhaltimet voivat puhaltaa molempiin suuntiin, joten niitä ohjataan tarpeen mukaisesti palon syttymiskohtan perusteella. Kuvan 4 esimerkistä nähdään, kuinka savuverhot jakavat vyöhykkeet palotilanteessa eri savulohkoiksi. Palo on syttynyt vyöhykkeellä 1, jolloin savusulkuna toimiva verho 1 on suljettuna ja verho 2 on avoinna. Savusulkuja käytetään yleisesti suuntapaine puhallukseen perustuvassa savunpoistossa (Rakennusten savunhallinta: suunnittelu, toteutus ja ylläpito 2020: 20, 150). On tärkeää huomioida, ettei käynnissä olevien impulssipuhaltimien siirtämä ilmavirta ylitä savunpoistopuhaltimien kapasiteettia, jotta välttytään haitalliselta ilman takaisinvirtaukselta (Components for smoke and heat control systems 2006: 18). Lisäksi tulee aina varmistua riittävän suuresta ja tarpeeksi matalanopeuksisen (enintään 5 m/s) korvausilmavirran saannista (Sandberg 2014a: 379).



Kuva 4. Havainnekuva eräästä suljetun pysäköintitilan palotilanteesta, jossa käytössä suuntapaine- eli jet-puhaltimet (Rakennusten savunhallinta: suunnittelu, toteutus ja ylläpito 2020: 151).

2.3.3 Automaattisen sammutusjärjestelmän kohteet

Suuret kalliopysäköintilaitokset varustetaan yleisesti automaattisella palonsammutusjärjestelmällä, kuten sprinklereillä. Lähtökohtaisesti automaattisella sammutuslaitteistolla varustetussa tilassa savukaasun määrä ja lämpötila pysyvät alempina, kuten kuvasta 5 voidaan havaita. Näiden tilojen savunpoistopuhaltimilta vaaditaan 200 °C:n kestoja vähintään kahden tunnin ajan, kun taas sprinklaamattoman kohteen puhaltimien kesto vaatimus on 400 °C kahden tunnin ajan (SFS 7025, 2010).



Kuva 5. Kohteen savun ja lämpötilan muodostuminen sprinklauksen kanssa (ohuet viivat) ja ilman (Rakennusten savunhallinta: suunnittelu, toteutus ja ylläpito 2020: 149).

On mahdollista, että savunpoistotilanteen suuntapaine puhallus vaikuttaa haitallisesti sprinklerijärjestelmän toimintaan, mikä täytyy ottaa huomioon yhteensovituksessa. Sprinkleriveden toiminta saattaa häiriintyä puhaltimen voimakkaan ilmavirran vaikutuksesta ja näin ollen heikentää järjestelmän tehokkuutta, tosin ongelma koskee lähinnä vesisumua hyödyntäviä sammutusjärjestelmiä (Rakennusten savunhallinta: suunnittelu, toteutus ja ylläpito 2020: 174).

Toinen seikka, johon on hyvä kiinnittää huomiota, on sammutusjärjestelmän laukaisuviive. Automaattisen savunpoiston tiloissa palotilanteen alussa sprinklerien laukeaminen saattaa viivästyä, koska suuntapaine puhallin alkaa CO-pitoisuuden noustessa

käydä täydellä teholla. Tällöin se siirtää ja viilentää lämmintä ilmassaa, eikä automaattinen sammutusjärjestelmä välttämättä aktivoidu optimaalisesti. Tutkimus kuitenkin osoittaa, että tämä viive ei ole merkittävä ja että esimerkiksi poistumisteiden suunnitellulla on paljon suurempi vaikutus. (Enright 2013.) Suunnitteluvaiheessa tämän huomioon ottamiseksi on myös paljon vaikutusmahdollisuuksia, kuten savunpoistolle asetettava viive tai vaihtoehtoisten sprinkleriratkaisujen käyttäminen. Ja kuten todettua, Suomessa yleensä palokunta itse käynnistää savunpoiston, jolloin se pystyy paremmin kontrolloimaan tilannetta (Suosalo 2021).

3 Liikenteen sähköistymisen vaikutukset

Suomessa sähköautojen ja ladattavien hybridautojen määrä ja saatavilla oleva mallisto jatkavat kasvuaan. Sähköautokannan kokonaismäärä on useana viime vuotena lähes tuplaantunut edellisvuodesta. Syyskuun 2020 loppuun mennessä Suomeen oli rekisteröitynä yhteensä 47 921 sähkö- ja lataushybridautoa, yleisimpinä valmistajina Tesla, Nissan ja Volkswagen. Määrä vastaa tälle hetkellä noin 1,7 %:a koko autokannasta. (7900 sähköautoa tieliikenteeseen rekisteröitynä Suomessa Q3/2020.) Ennusteet sähköautokannan kehittymisestä seuraavan 10 vuoden aikana vaihtelevat suuresti riippuen tutkimuksesta ja toisaalta myös valtion ohjauskeinoista. Eri raporttien määrääarviot vuoden 2030 sähköautokannasta vaihtelevat hallituksen vuonna 2016 asettamasta 250 000:sta Autoalan uuteen 580 000:een. (Liikenteen vaihtoehtoisten käyttövoimien ja -keluinfra 2019.) Tällöin osuus tulisi olemaan 9–21 % nykyisellä kokonaisautokannalla laskettuna. Tavoitteet eivät erittele täyssähkö- ja lataushybridautoja, joilla on kuitenkin eroavaisuuksia esimerkiksi päästöjen tuoton sekä akuston kapasiteetin ja paloturvallisuuden osalta.

Sähköautojen yleistymisen taustalla on voimakkaasti kasvanut sekä julkisten että kaupallisten latauspaikkojen määrä. Tämän lisäksi vaikuttavina tekijöinä ovat latausteknologian kehittyminen ja akkujen kapasiteettien kasvaminen. Tutkimusten mukaan auton akuston keskimääräinen toimintamatka voi jatkossa olla jopa yli 50 % parempi. Tällä hetkellä se on keskimäärin 400 kilometriä kun vuoden 2025 jälkeen voidaan saavuttaa yli 600 kilometrin keskikantamia. (Sähköisten ajoneuvojen vakuuttamisen toimintaympäristö - nykytila ja lähitulevaisuus 2019.)

3.1 Sähkökäyttöisten autojen paloturvallisuus

Lähestulkoon kaikki markkinoilla olevat sähköautot käyttävät tällä hetkellä akkuteknologianaan litiumioniakkua. Muut teknologiat, kuten kiinteäelektrolyyttinen solid-state-akku, tarjoavat tulevaisuudessa hyviä ja palovarmoja ratkaisuja (Suosalo 2021). Ne ovat kuitenkin vielä vahvasti kehitysasteella, joten litiumioniratkaisut tulevat olemaan valta-asemassa vuosia eteenpäin. Li-ion-akkuihin liittyy kuitenkin muutamia ominaisuuksia, jotka

täytyy huomioida paloturvallisuuden näkökulmasta. (Sähköisten ajoneuvojen vakuuttamisen toimintaympäristö - nykytila ja lähitulevaisuus 2019.)

Keskeisimmät turvallisuusuhkat litiumioniakuissa ovat eritoten tulipalon vaara sekä kemialliset riskit ja sähköiskut. Tulipaloriskiä kasvattaa akussa esiintyvä ilmiö, jota kutsutaan lämpökarkaamiseksi. Tässä akun sisällä olevat kemikaalit ja elektrolyytit hajoavat ja alkavat tuottaa voimakkaasti lämpöenergiaa, mikä lämpötilan tarpeeksi noustessa voi johtaa liekkipaloon. Ilmiön vaarallisuutta lisäävät akuston suuri energialataus sekä elektrolyyttien palamisherkyys ja palamiseen tarvittavan lisähapen muodostuminen akun omista kemiallisista reaktioista. Tehokkaimmin litiumioniakkupaloa rajoitetaan ja sammutetaan vedellä. Palo voi kuitenkin syttyä myös viivästyneesti tai jopa uudelleen sammutuksen jälkeen. (Muuttuva rakennettu ympäristö ja uudet teknologiat 2020.)

Lämpökarkaamista voivat aiheuttaa muun muassa lämpötilan nopea nousu tulipalossa, sisäinen oikosulku esimerkiksi lataamisen yhteydessä, jännitepiikit sekä ulkoiset iskut ja kolhut. Akkupalossa vapautuu runsaasti myös erittäin myrkyllisiä nesteitä ja kaasuja. Akkukemikaalien lisäksi myrkykkaasuja voivat aiheuttaa ympäröivät materiaalit, jotka palon yhteydessä syttyvät myös. Tämän lisäksi on olemassa sähköiskun vaara, kun kyseessä on jollakin tavalla vaurioitunut tai puutteellisten sähköisin turvajärjestelmin varustettu akusto. Tarkoitukseen sopimattoman latauspistokkeen käyttö voi myös lisätä riskiä akun toiminnan häiriöille. (Sähköisten ajoneuvojen vakuuttamisen toimintaympäristö - nykytila ja lähitulevaisuus 2019.)

Sähköajoneuvot ovat yleistyneet katukuvassa merkittävästi viime vuosina. Mediassa on uutisoitu useita tapauksia, joissa sähköauto on saattanut syttyä palamaan joko ajon aikana tai latauksessa. Tutkittua tietoa esimerkiksi akuston kemiallisten reaktioiden etenemisestä ja akkupalon käyttäytymisestä on kuitenkin vielä vähän, joten riskien todennäköisyyksien arviointi on hankalaa. (Muuttuva rakennettu ympäristö ja uudet teknologiat 2020.) Yhdysvalloissa tapahtuu päivittäin 150 polttomoottoriautopaloa, jotka eivät saa vastaavaa mediahuomiota. Yhdysvaltain liittovaltion liikenneturvallisuusvirasto NHTSA on arvioinut, että sähköautoakkujen alttius aiheuttaa tulipalo on polttomoottoriautojen luokkaa tai jopa matalampi. (Sähköisten ajoneuvojen vakuuttamisen toimintaympäristö - nykytila ja lähitulevaisuus 2019.)

3.2 Maanalaiset pysäköintitilat

Akun palamiseen liittyvät ominaispiirteet tekevät palon torjunnasta, rajoittamisesta ja sen sammuttamisesta haasteellista. On tärkeää pystyä luotettavasti ja alkuvaiheessa havaitsemaan tulipalo ja sen mahdollisesti aiheuttanut ajoneuvotyyppi. Tällöin saadaan mahdollisimman nopeasti paikan päälle tarvittavat palo- ja pelastuskalustot, joilla mahdollistetaan palavan kohteen hallinta ja palon sammuttaminen. (Muuttuva rakennettu ympäristö ja uudet teknologiat 2020.)

3.2.1 Sähköautopalo

Sähköautoaloista vapautuvan energian eli palokuorman määrä on herättänyt keskustelua ja tutkimuksia. Tämän hetken tutkimustulokset osoittavat, ettei palokuorma poikkea merkittävästi tavallisesta polttomoottorikäyttöisestä autosta (Sähköautojen ja niiden latauspisteiden paloturvallisuudesta 2020). Molemmissa ajoneuvotyypeissä palokuormaa aiheuttavat muun muassa auton muoviosat sekä auton käyttövoiman määrä ja laatu eli sähkökäyttöisessä autossa akuston tyyppi ja varausaste ja polttomoottoriautossa polttoaineen määrä (Suosalo 2021). Sähköautoilla ei nykytiedon mukaan ole juuri vaikutuksia savunpoiston mitoitukseen, mikäli käytössä on asianmukaisesti mitoitettu palon etenemistä rajaava automaattinen sammutuslaitteisto (Kontkanen 2021). Eroja tulee kuitenkin litiumioniakun palamisen sammutustekniikoissa ja siihen kuluva ajassa ja jälkivalvonassa. Myöskään kaikkiin palosta vapautuviin aineisiin ei ole vielä suojarusteita markkinoilla (Muuttuva rakennettu ympäristö ja uudet teknologiat 2020).

Vaativaksi palon sammuttamisen kalliopysäköintilaitoksessa tekee sen vaikea saavutettavuus maan alla, mikä aiheuttaa haasteita niin palokunnan toiminnalle kuin poistumisturvallisuudellekin. Akkupalon sammuttaminen voi kestää jopa 48 tuntia ja vaatia vettä jopa yli 11 000 litraa (Pelastustyöntekijöiden opas 2019). Akustojen vaikutuksia sammutusveden epäpuhtauksiin on tutkittu sekä laboratorio-olosuhteissa että kentällä. Norjan Stavangerin suuren pysäköintialuepalon jälkiselvityksessä havaittiin, etteivät sähköautojen akut aiheuttaneet lähiympäristölle riskiä. Toisaalta koeolosuhteissa on saatu myös vastakkaisia tutkimustuloksia. Tällä hetkellä ruiskusammutuksen sammutusvesiä ei kerätä talteen, pois lukien eräät poikkeukset, kuten voimalaitokset. (Suosalo 2021.) Tätä osa-aluetta ja vaikutuksia on siis tärkeä tutkia jatkossa lisää.

Akustopalolle on ominaista myös uudelleensyttymisen vaara, minkä vuoksi palossa tai kolarissa ollut auto täytyy pitää vähintään 15 metrin päässä muusta syttyvästä materiaalista. Joissakin tilanteissa akkupalon on parasta antaa hallitusti palaa loppuun ilman merkittävää vesisammutusta. (Pelastustyöntekijöiden opas 2019.) Sammutusvaihtoehdoista auton upottaminen kokonaan veteen on todettu tehokkaaksi, sillä syttyneeseen akustoon on haastava päästä suoraan vesiruiskulla käsiksi. Esimerkiksi Päijät-Hämeen pelastuslaitos on ottanut käyttöönsä siirtolavakonttiratkaisun, jonne sähköauto voidaan alkusammutuksen jälkeen sulkea. Vettä täytetään konttiin niin, että akusto jää veden pinnan alle. (Lähdetuoma 2020.) Vedellä täytettävä kontti on kuitenkin suurikokoinen ja sen siirtäminen vaatii ympärilleen paljon tilaa. Maan alla palamaan syttynyt sähköauto täytyykin konttiin upottaessa ensin saada tuotua rakennuksen ulkopuolelle, mikä voi olla haastava toimenpide palokunnalle.

Suosalon (2021) mukaan vedellä täytettävä kontti ei takaa palon täydellistä sammutusvarmuutta, sillä ajoneuvo saattaa syttyä viivästyneesti myös kontista pois oton jälkeen. Parempi ratkaisu hänen mielestään olisi kehittää turvallinen tapa akun varauksen purkamiseen hallitusti palotilanteen aikana. Kalliopysäköintilaitoksessa henkilö- ja poisturakennuksen kytkeytyy vahvasti myös sähköautojen latauspaikkojen sijoittelu. Paloturvallisuussuunnittelun etusijalla tulee olla myrkyllisten kaasujen riskien ja kulkeutumisen arviointi, kohdekohtaiset tekniset ratkaisut sekä pelastuslaitoksen mahdollisimman esteetön toiminta. (Muuttuva rakennettu ympäristö ja uudet teknologiat 2020.)

3.2.2 Latauspisteet ja latauspistevalmiudet

Lokakuussa 2020 voimaan tullut laki (Laki rakennusten varustamisesta sähköajoneuvojen latauspisteillä ja latauspistevalmiuksilla sekä automaatio- ja ohjausjärjestelmillä 2020) määrittää uuden muun kuin asuinrakennuksen yhteydessä olevan rakennuksen sähköautopaikeista seuraavaa:

Sellaisen uuden muun rakennuksen kuin asuinrakennuksen yhteyteen, jossa on yli 10 pysäköintipaikkaa, on asennettava yksi suuritehoinen latauspiste tai vaihtoehtoisesti:

- 1) vähintään yksi normaalitehoinen latauspiste, jos pysäköintipaikkoja on 11–50;

2) vähintään kaksi normaalitehoista latauspistettä, jos pysäköintipaikkoja on 51–100;

3) vähintään kolme normaalitehoista latauspistettä, jos pysäköintipaikkoja on yli 100.

Sen lisäksi, mitä 3 momentissa säädetään, sellaisen uuden muun rakennuksen kuin asuinrakennuksen yhteyteen, jossa on 11–30 pysäköintipaikkaa, on asennettava latauspistevalmius vähintään 50 prosenttiin pysäköintipaikoista. Jos pysäköintipaikkoja on yli 30, latauspistevalmius on asennettava vähintään 20 prosenttiin pysäköintipaikoista kuitenkin niin, että latauspistevalmius on vähintään 15 pysäköintipaikassa. Jos pysäköintipaikkaan asennetaan latauspiste, se täyttää pysäköintipaikan latauspistevalmiutta koskevan vaatimuksen.

Jos rakennuksessa tehdään laajamittaisia, yli 25 % rakennuksen arvosta olevia korjaustoimenpiteitä, sovelletaan latauspisteiden ja latauspistevalmiuspaikkojen määrässä samoja lukuja kuin yllä. Toisaalta mikäli kyse on uuden tai laajamittaisesti korjattavan asuinrakennuksen yhteydessä olevasta yli neljän paikan pysäköintitilasta, täytyy jokaiseen pysäköintipaikkaan olla mahdollisuus myöhemmin asentaa latauspiste. (Laki rakennusten varustamisesta sähköajoneuvojen latauspisteillä ja latauspistevalmiuksilla sekä automaatio- ja ohjausjärjestelmillä 2020.)

Kaikkien sähköajoneuvojen latausasemien teknisten ratkaisujen tulee olla sähkö- ja paloturvallisia, sillä latauspiste voi huonokuntoisena johtaa jopa tulipaloon. Tämän vuoksi erillinen juuri sähköautoille suunniteltu latausasema on turvallisin vaihtoehto. Tällä hetkellä asetus rakennusten paloturvallisuudesta ei kuitenkaan ota kantaa sähköautojen paloriskiin tai niiden vaikutukseen rakenteelliseen paloturvallisuuteen. (Muuttuva rakennettu ympäristö ja uudet teknologiat 2020.) Suosalo (2021) ei juuri näe ongelmaa paloturvallisuuden kannalta puhuttaessa uudisrakennuksista, joissa nämä seikat otetaan asianmukaisella tarkkuudella huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Sen sijaan korjaushankekohteissa paloturvallisuuden takaaminen voi osoittautua haasteellisemmaksi tulevaisuudessa sähköautopaikkojen yleistyessä.

4 Case: Keilaniemen kalliopysäköintilaitos

Espoossa Keilaniemen ja Otaniemen yhdistävälle kasvavalle Kivimiehen alueelle on tarkoitus rakentaa usean tuhannen auton kalliopysäköintilaitos (kuva 6). Hanke toteutetaan vaiheittain alueen autopaikkatarve huomioiden. Pysäköintilaitokseen on suunnitelmassa rakentaa viisi vierekkäistä kaksikerroksista hallia ja yksikerroksinen väestönsuoja. Ensimmäisessä vaiheessa rakennetaan pysäköintitilat 1 600 ajoneuvolle. Pysäköinti tulee olemaan vuorottaisperiaatteella ilman nimettyjä autopaikkoja, jolloin sama määrä autopaikkoja riittää useammalle käyttäjälle. (Keilaniemen suunnitellaan kalliopysäköintilaitosta 2020.)



Kuva 6. Pysäköintilaitoksen suunnittelualue kartalla. Kuvaan lisätty karkea arvio ensimmäisen rakennusvaiheen kahden yli 600 metriä pitkän vierekkäisen pysäköintihallin sijainnista.

4.1 Ilmanvaihtoratkaisu ja ilmanlaatu

Keilaniemen kalliopysäköintilaitoksen hallien ilmanvaihdon voidaan katsoa olevan määntävirtaukseen perustuva sekoittava pitkittäisilmanvaihto, jota ohjataan CO-antureiden (alustavasti määrä 3 kpl / 100 metriä) tiedon perusteella. Siinä tuloilmapisteeeltä luodaan suuntapainepuhaltimien avulla koko tilan läpi yhdensuuntainen häiriövirtaukset syrjäyttävä virtauskenttä poistoilmapisteeelle, josta otetaan pyörivän LTO-kiekon avulla lämpöä talteen takaisin tuloilmaan. Tässä yhteydessä myös pieni määrä poistoilman epäpuhtauksia siirtyy tuloilmaan. Kahden vierekkäisen hallin ilmavirrat kulkevat vastakkaisiin suuntiin ja lämmöntalteenotto on yhdistetty, jolloin molempien hallien poistoilmasta saadaan lämpöä siirrettyä tuloilmaan. Tulo- ja poistoilmavirrat mitoitetetaan yhtä suuriksi. Suuntapainepuhaltimien määrä ja sijainti varmistuu simuloinnin perusteella. Tavoitteena on johtaa suuri tuloilmavirta mahdollisimman matalalla lähtönopeudella, jotta saadaan aikaan korkea ilman vaihtuvuus, lämpötilatehokkuus ja epäpuhtauksien poistotehokkuus (Sandberg 2014a: 256). Kalliopysäköintilaitokseen tulee useampi ajoyhteys maan tasalle. Näiden ilmanvaihto mitoitetetaan erikseen, joten niiden aiheuttamia epäpuhtauskuormia ei oteta huomioon tässä tutkimuksessa.

Moottorikäyttöisten ajoneuvojen pakokaasupäästöt sisältävät lukuisia ympäristölle ja ihmisille haitallisia kaasumaisia ja kiinteitä yhdisteitä. Merkittävimmät näistä ovat hiilimonoksidi, typen oksidit, bentseeni, hiilidioksidi, hiilivedyt, lyjy, metaani, rikkidioksidia ja typpioksiduuli. Sähköautoissa näitä ei luonnollisesti ajon aikana synny. Vaikka dieselautoissa typen oksidipäästöt ovat bensiiniautoja suuremmat, käytetään mitoittavana tekijänä mitoitusoppaan mukaisesti hiilimonoksidi- eli häikäpitoisuutta. Sen arvo ei saa ylittää arvioidusti eniten epäpuhtauksia aiheuttavana käyttötuntina 35 mg/m³, joka vastaa lukemaa 30 ppm. (Moottoriajoneuvosuojan ilmanvaihdon mitoitusopas 2018.)

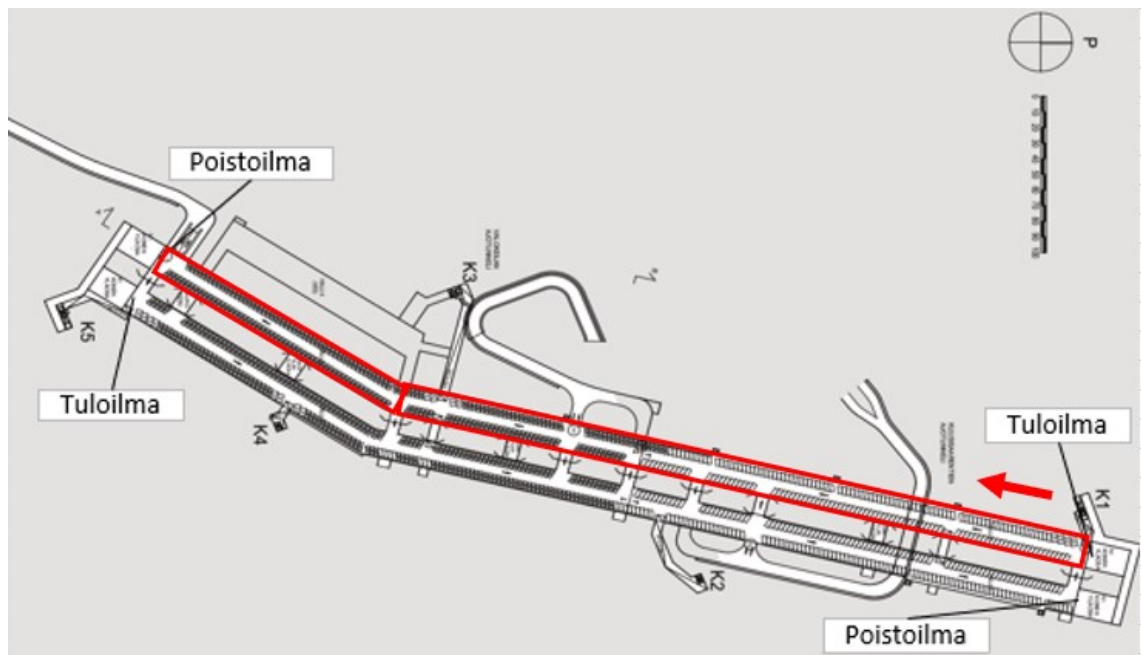
4.2 Ilmanlaatututkimuksen lähtökohdat

Keilaniemen pysäköintilaitoksen ensimmäisessä vaiheessa rakennettavat hallit ovat kooltaan erityisen pitkän mallisia (kuva 7). Pitkittäisilmanvaihto suuntapainepuhaltimien on normaali tapa ratkaista pysäköintihallien ilmanvaihtoa, mutta yleensä hallin pituudet ovat huomattavasti pienempiä. Tämä on herättänyt huolen siitä, saadaanko suuntapainepuhaltimilla siirrettävä ilma pidettyä riittävän puhtaana myös hallin loppuosassa poistoilmalaitetta lähestyttäessä.

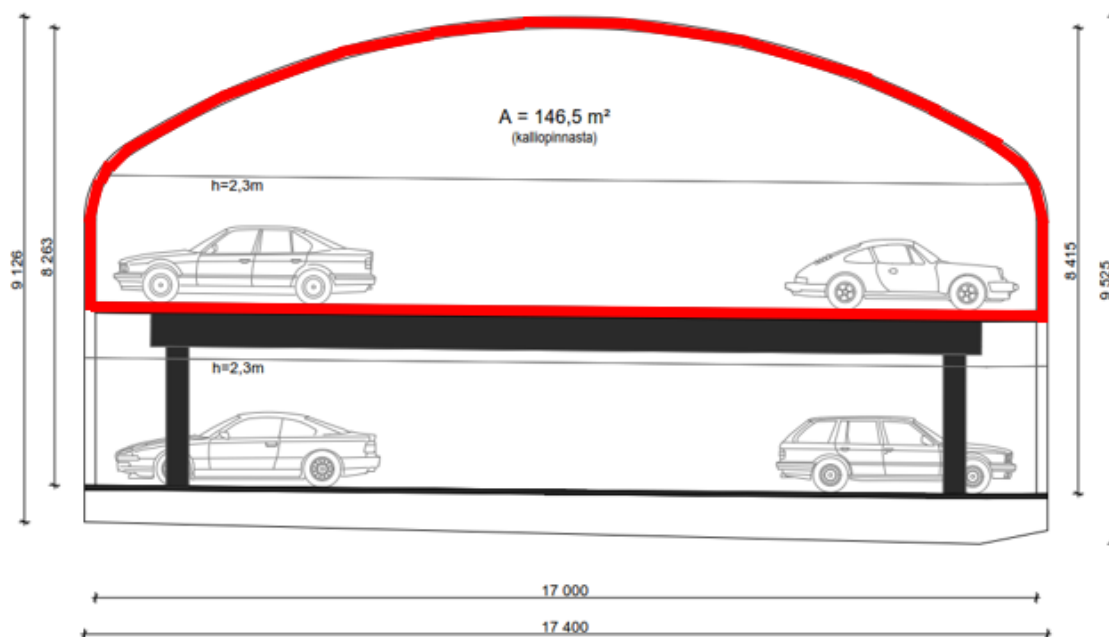
Tutkimusta varten on selvitetty useita mahdollisia tapoja lähestyä ongelmaa. Alussa pohdittiin mahdollisuutta tarkastella ilman laadun käyttäytymistä CFD-virtaussimuloinnilla tai ottaa käyttöön esimerkiksi IDA-pohjainen ohjelmisto, kuten IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) tai IDA Road Tunnel Ventilation (IDA RTV). Erityisesti CFD- eli numeerisella virtauslaskennalla yleisesti mallinnetaan ilman suuntaa ja nopeutta ja esimerkiksi kohtia, joissa ilma jää pyörimään eikä vaihdu optimaalisesti. IDA-ohjelmistojen hyödyntämistä tutkittiin, mutta todettiin, että IDA ICE soveltuu paremmin pienempiin rakennuksiin ja IDA RTV on nimensä mukaisesti optimoitu maantietunneleille. Myöhemmässä suunnittelun vaiheessa suoritetaan tarkempi suuntapainepuhaltimien määrää ja sijoittelua koskeva mallintaminen, joten tässä tutkimuksessa pääkohtana on tehdä nimenomaan ilman CO-pitoisuuden tarkastelu hallissa ja siihen perustuva ilmanvaihdon mitoitus.

Voidaan tehdä olettaus, että myöhemmillä simuloinneilla varmistetaan ilman hallittu kuljettaminen hallissa, joten tässä tutkimuksessa ilmavirran voidaan olettaa säilyvän vakiona koko hallin matkalla. Taulukkolaskentamenetelmillä saadaan näillä lähtöarvoilla ja tutkimustarpeella yleisesti riittävän tarkka mallinnus varsinkin tasapainotilannetta laskettaessa (Sandberg 2014a: 384). Tällöin laskenta voidaan suorittaa MS Excelillä hyödyntäen mitoitusoppaan laskentakaavoja ja taulukkoarvoja sekä projektin muita lähtötietoja. Tutkimuskysymyksenä on selvittää, onko taulukkoarvona saatava pinta-alaan pohjautuva mitoitus $29,8 \text{ m}^3/\text{s}$ ($2,7 \text{ l/s/m}^2$) riittävä ilman laadun kannalta vai tarvitaanko väliin esimerkiksi lisätuloilmapistettä. Jos ilmenee, että em. mitoitus on ylimitoitettava, selvitetään optimaalinen ilmavirta.

Ensimmäisen rakennusvaiheen aikana rakennetaan yhteensä noin 1 600 autopaikan pysäköintitilat. Kuvan 7 mukaisesti vierekkäin on kaksi alustavasti jopa 650 metriä pitkää ja 17 metriä leveää hallia kahdessa kerroksessa, joiden lisäksi useita ajoyhteyksiä maantasolle ja P2-kerrokseen sijoittuvat väestönsuojatilat. Vierekkäiset hallit yhdistää myös muutama ajoyhteys, joissa tapahtuu ilmavirtojen sekoittumista niiden välillä. Tämä on otettu laskelmissa huomioon ajoneuvojen sisään- ja ulosajomäärissä. P1- ja P2-kerrokset ovat pinta-alaltaan lähes identtiset, molemmat noin 21 000 m². Ylemmän P1-kerroksen tilavuus on hieman suurempi (kuva 8). Voidaan olettaa, että toisen kerroksen mallintaminen vastaa riittäväällä tarkkuudella molempia. Hallien eteläpäässä on runsasliikenteinen ajoyhteys Keilalahdentielle. Tämän voidaan olettaa nostavan epäpuhtauspitoisuutta hallin päässä. Tarkasteluun halutaan valita haasteellisin olosuhde, joten mallinuksessa käytetään P1-tason länsipuoleista hallia (kuva 7), jonka poistoilmapiiste sijaitsee ajoyhteyden läheisyydessä.



Kuva 7. P1-taso, johon lisäksi merkittynä pitkien hallien alustavat tulo- ja poistoilmapiisteet ja tarkasteltava halli. Oikean yläkulman mittaviiva vastaa 100 metriä. (Pohjapiirustus 2021.)



Kuva 8. Periaatekuva yhden hallin poikkileikkauksesta, punaisena korostettuna P1-taso (Poikkileikkaukkuva 2020).

4.2.1 Epäpuhtauskuormituksen laskeminen

Epäpuhtauskuormitukseen perustuvassa ilmvaihdon mitoituksessa tehdään ensin laskelma hallin sisäiselle epäpuhtauskuormalle. Tämän jälkeen mitoitetaan ilmavirta, jolla hallin sisäilman epäpuhtaus saadaan pidettyä määrätyn raja-arvon alapuolella. Apuna käytetään ympäristöministeriön vuoden 2018 moottoriajoneuvosuojan ilmanvaihdon mitoitusopasta sekä projektin lähtötietoja ja muiden suunnittelualojen laskelmia. Ympäristöministeriön opas sisältää eri käyttötilanteiden epäpuhtauspitoisuuksien taulukkoarvot (taulukko 2), joilla voidaan arvioida moottoriajoneuvosuojan sisäilmaan tulevia ajoneuvokohtaisia epäpuhtauskuormituksia.

Taulukko 2. Pakokaasujen epäpuhtauspitoisuudet eri käyttötilanteissa henkilöautoilla (Moottorijoneuvosuojan ilmanvaihdon mitoitusopas 2018).

Käyttötilanne	Moottorijoneuvosuojan talven lämpötila	Epäpuhtaus			
		Hiilimonoksidi CO		Typen oksidit NO _x	
		Pysäköinnin keskimääräinen pituus ¹⁾			
		<2h	>2h	<2h	>2h
Käynnistys, g	Lämmittämätön (< +5 °C)	12,0	25,0	0,72	0,75
	Puolilämmin (+5...+17 °C)	10,0	15,0	0,20	0,21
	Lämmin (> +17 °C)	3,0	3,0	0,23	0,23
Ulosajo ²⁾ , g/m	Lämmittämätön (< +5 °C)				
	Puolilämmin (+5...+17 °C)	0,0012	0,0012	0,0005	0,0005
	Lämmin (> +17 °C)	0,0008	0,0008	0,0006	0,0006
Sisäänaajo ²⁾ , g/m		0,001		0,001	
Tyhjäkäynti g/min		0,20		0,10	

¹⁾ Moottorilämmitintä käytettäessä käytetään arvoa pysäköinnin pituus < 2 h

²⁾ Henkilöauton ylämäkeen ajolle käytetään päästökerrointa 2,5. Alamäkeen ajolle käytetään päästökerrointa 0,2.

Mitoittavaksi käyttötilanteeksi valitaan tunnin jakso, jolloin tilan epäpuhtauskuormituksen arvioidaan olevan suurin. Koska ajoneuvon käynnistys tuottaa yleensä suurimman epäpuhtauden, valitaan aikajakso, jolloin tilassa tapahtuu eniten lähtevää liikennettä (Moottorijoneuvosuojan ilmanvaihdon mitoitusopas 2018). Tämä ajankohta saadaan Sitowisen laatimasta liikenne-ennusteesta (taulukko 3). Liikennesuorite on arvioitu vuodelle 2025, jolloin ensimmäisen vaiheen rakennus on suunnitellusti valmiina ja käytössä. Mitoittavaksi ajankohdaksi valitaan iltahuipputunti, jolloin käynnistettävien ja lähtevien autojen määrä on suurin. Taulukon muiden kohtien eli vuosien 2030 ja 2040 ajoneuvomäärien ei katsota merkittävästi vaikuttavan nyt rakennettavien pysäköintihallien ajoneuvomääriin myöskään tulevaisuudessa, sillä myöhemmissä rakennusvaiheissa viereen rakennetaan lisää pysäköintihalleja, joihin ajoneuvomäärä jakautuu.

Taulukon 3 mukaisesti mitoittavan iltahuipputunnin (IHT) aikana pysäköintilaitokseen saapuva automäärä on 70 kpl ja sieltä poistuva 462 kpl. Kokonaisajoneuvomääränä on käytetty 1 500:aa autopaikkaa, kun tämänhetkinen arvio on 1 600 paikkaa. Skaalataan ajoneuvomäärät samassa suhteessa, jolloin saadaan saapuvaksi määräksi 75 kpl ja lähteväksi 493 kpl. Täytyy huomioida, että nämä luvut sisältävät koko 1 600-paikkaisen pysäköintitilan. Koska pysäköintilaitokseen tulee nykyaikainen liikenneohjausjärjestelmä,

oletetaan, että ajoneuvot jakautuvat tasaisesti molempiin kerroksiin ja halleihin. Tällöin yhden hallin automääräksi saadaan 19 saapuvaa ja 123 lähtevää autoa. Sähköautopaikkoja pysäköintitilaan on suunnitteilla noin puolet kokonaismäärästä. Arvioitu vuoden 2030 sähköautokanta on 9–21 %, minkä perusteella tehdään maltillinen olettaus vuonna 2025 valmistuvan rakennuksen sähköautojen osuudeksi 5 %. Pysäköintilaitoksen pääasiallinen käyttöryhmä tulee olemaan toimisto- ja liiketilojen käyttäjät, joten keskimääräiseksi pysäköintiajaksi arvioidaan yli 2 tuntia. Hallin mitoittavana sisälämpötilana käytetään lämmityskaudella lämpötilaa 12 °C, eli tila on puolilämmin. Ulkoilman CO-pitoisuudeksi oletetaan 4 mg/m³ (Moottoriajoneuvosuojan ilmanvaihdon mitoitusopas 2018).

Taulukko 3. Pysäköintilaitoksen huipputunnin arvioidut liikennemäärät hankkeen eri vaiheille. Kuvaan lisätty punaisella tämän tutkimuksen kannalta olennaisin kohta. (Keilaniemen kalliopysäköintilaitos 2020.)

Pysäköintipaikat	2025		2030		2040	
	AHT	IHT	AHT	IHT	AHT	IHT
Saapuvaa matkaa (ajon / h)	499	70	765	131	997	140
Lähtevää matkaa (ajon / h)	69	462	137	709	137	924

Pysäköintihallin mitoittava epäpuhtauskuorma koostuu tilassa tapahtuvien ajoneuvojen käynnistysten, liikkumisten ja tyhjäkäyntien aikaisista polttomoottorikäyttöisten ajoneuvojen CO-päästöistä. Liitteenä 1 on Keilaniemen pysäköintilaitoksen yhden hallin epäpuhtauslaskelma ja sen perusteella tehty ilmavirtamitoitus. Sähköautojen osuus (5 %) vähennetään laskelmissa, joten tästä eteenpäin tutkimuksessa ajoneuvolla tarkoitetaan vain CO-päästöjä tuottavaa. Ajoneuvojen käynnistyksiä suoritetaan mitoittavan tunnin aikana 117 kpl. Näin ollen käynnistysten aiheuttama epäpuhtauskuorma on 117 kpl * 15 g = 1 756 g/tunti.

Saapuvaksi liikenteeksi huomioidaan vierekkäisistä halleista molempien liikennevirrat, sillä ajoneuvoilla tapahtuu joka tapauksessa läpiajoa hallien välillä. Keskimääräinen yhden ajoneuvon ajomatka arvioidaan pohjakuvasta ja apuna käytetään myös muissa kohteissa tehtyjä arvioita. Matkana käytetään 350:tä metriä. Tästä saadaan sisäänajojen epäpuhtauskuormaksi 35 kpl * 350 m * 0,001 g/m = 12,4 g/tunti.

Lähtevän liikenteen osalta huomioidaan myös molempien saman kerroksen hallien ajoneuvomäärät ja ajomatkana käytetään samaa 350:tä metriä. Lähtevien ajoneuvojen aiheuttama epäpuhtauskuorma on $234 \text{ kpl} * 350 \text{ m} * 0,0012 \text{ g/m} = 98,3 \text{ g/tunti}$. Keskimääräisenä tyhjäkäyntiaikana käytetään mitoitusoppaan mukaisesti 30:tä sekuntia. Näin ollen saadaan tyhjäkäyntien aiheuttamaksi CO-kuomaksi $0,5 \text{ min} * 234 \text{ kpl} * 0,2 \text{ g/min} = 23,4 \text{ g/tunti}$. Taulukosta 4 havaitaan, että mitoittavan tuntina tyhjäkäynnin ja saapuvan liikenteen osuus on käytännössä olematon verrattuna käynnistyksistä ja lähtevästä liikenteestä muodostuvaan CO-kuormitukseen.

Taulukko 4. Eri epäpuhtauskuormien (g/tunti) suhteellinen osuus kokonaisuudesta.

Käyttötilanne	CO-kuorma	%-osuudet
Käynnistys	1756	93 %
Saapuva (ml. läpiajo)	12	1 %
Lähtevä (ml. läpiajo)	98	5 %
Tyhjäkäynti	23	1 %
yht.	1890	

Mitoituslaskelmissa tulee käyttää suurimman epäpuhtauskuormituksen ajankohdan lisäksi riittävää varmuusmarginaalia (Moottorijoneuvosuojaan ilmanvaihdon mitoitusopas 2018). Tämän vuoksi saatuun kokonaisepäpuhtauskuormitukseen lisätään 10 %:n varmuusvara, jolloin arvoksi saadaan 2 079 g/tunti eli 577 mg/s. Lisäksi painotetaan hallin ajoyhteyksien kohtia niiden arvioitujen liikennemäärien perusteella. Sitowiselta saatujen liikenne-ennusteiden mukaan mitoittavana tuntina Kuusisaaren ja Keilaniemen portin ajotunnelit, eli hallin pohjoisin ja eteläisin ajoyhteys, ovat selvästi vilkkaammat kuin keskimäinen eli Valokeilan ajoyhteys. Näihin kahteen kohtaan lisätään lasketun vakio-CO-kuorman lisäksi korotus arvioidun käyttöasteen mukaan. Tämän avulla pyritään huomioidaan ja kompensoimaan laskelmissa suuremman ajoneuvoliikenteen aiheuttamat häiriövirtaukset sekä pitkässä hallissa tapahtuvaa epäpuhtauskuormien pakkautumista tilan toisen pään poistoilmalaitetta lähestyttäessä.

4.2.2 Ilmanvaihdon mitoitus epäpuhtauskuormituksen perusteella

Aluksi haluttiin selvittää, onko pinta-alaan perustuva $2,7 \text{ l/s/m}^2$ ilmavirta riittävä, ettei ilman CO-pitoisuus nouse yli raja-arvon 35 mg/m^3 myöskään hallin loppupäässä. Tutkitavan hallin pinta-ala on $11\,000 \text{ m}^2$, joten ilmavirraksi (q_v) saatiin $29,8 \text{ m}^3/\text{s}$, joka pidettiin vakiona koko matkalla. Hallin pinta-ala ja keskimääräinen epäpuhtauskuormitus (G) jaettiin kymmeneen yhtä suureen osaan (taulukko 5). Tällä tavoin voitiin tarkemmin havainnollistaa epäpuhtauksien eteneminen hallin matkalla. Alueita tutkittiin omina vyöhykkeinä, joissa kaikissa ilman epäpuhtauksien oletetaan sekoittuvan vyöhykkeen ilmaan täydellisesti eli jokaisen alueen poistoilman epäpuhtauspitoisuus (C_{poisto}) siirrettiin vastaamaan seuraavan alueen tuloilman epäpuhtauspitoisuutta (C_{tulo}). Periaatteesta voidaan käyttää nimeä monivyöhyke- tai monilokeromalli (Sandberg 2014a: 384). Kuten taulukosta 5 nähdään, epäpuhtauskuormitusta (mg/s) nostettiin noin 250 metrin kohdalla 30 % ja noin 600 metrin kohdalla 15 %. Nämä perustuivat liikennesuunnittelusta saatuihin mitoittavan tunnin liikennemääriin kyseisissä ajoyhteyksissä.

Taulukko 5. Tasapainotilanteen laskentaesimerkki ilmavirralla $2,7 \text{ l/s/m}^2$.

Lähtötilanne	0-65	130	195	260	325	390	455	520	585	650 m	
q_v	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	m^3/s
C_{tulo}	4,0	5,9	7,8	9,7	11,7	14,2	16,7	19,2	21,7	24,2	mg/m^3
C_{poisto}	5,9	7,8	9,7	11,7	14,2	16,7	19,2	21,7	24,2	27,1	30,0 mg/m^3
G	57,7	57,7	57,7	57,7	75,1	75,1	75,1	75,1	75,1	86,3	86,3 mg/s
Ajoliittymien painotus					+30%					+15%	

Laskelmat tehtiin kahdella tapaa, tasapainotilanteessa ja ajasta riippuvassa tilanteessa. Tällä tavoin haluttiin lisätä tutkimuksen luotettavuutta ja tuoda vertailtavuutta. Ulkoilman pitoisuus on aiemmin mainittu 4 mg/m^3 , mutta siihen lisättiin muun muassa lämmön talteenotosta johtuvaa epäpuhtauksien sekoittumista. Kun lämmöntalteenoton laitteen tiivyttyä ei tunneta, voidaan tuloilmassa olettaa olevan 6 % sekoittunutta poistoilmaa (Mootoriajoneuvosuojaan ilmanvaihdon mitoitusopas 2018). Tämä sekoittuminen huomioon ottaen ensimmäisen alueen tuloilman hiilimonoksidipitoisuudeksi laskettiin $35 \text{ mg/m}^3 * 0,06 + 4 \text{ mg/m}^3 * 0,94 = 5,9 \text{ mg/m}^3$.

Tasapainotilanteeseen perustuvassa laskelmassa sovellettiin kaavaa 1, jolla ratkaistiin alueittain poistoilman epäpuhtauspitoisuus. Tämä arvo kasvoi hallin matkalla kumulatiivisesti alueelta seuraavalle, kun edellisen alueen epäpuhtausarvo siirrettiin seuraavan alueen tuloilman epäpuhtaudeksi. Epäpuhtauksien arvioitiin siis sekoittuvan tilassa täydellisesti eli tarkasteltavan tilan ja poistoilman epäpuhtauspitoisuudet oletettiin samoiksi. Lähtötietoina käytettiin vakioilmavirtaa, laskettua epäpuhtauskuormitusta ja alueen pinta-alaa. Tilan tilavuudella ei ole merkitystä, kun laskuissa käytetään tasapainotilanteen hakua eli pitoisuus hakeutuu samaan arvoon kaiken kokoisissa tiloissa (Sandberg 2014b: 101). Kuvassa 9 tasapainotilan haulla saadut arvot ovat merkittynä punaisella käyrällä.

Toisena laskutapana käytettiin ajasta riippuvaa tapausta. Se toteutettiin samoilla ilma- virta-, epäpuhtaus- ja alkuarvoilla kuin tasapainotilanteen haussa. Sandbergin (2014a: 398) mukaan aikariippuvassa tilanteessa kaikki lähtötiedot muuttuvat tai voivat muuttua ajan funktiona, tässä tutkimuksessa lähes kaikki alkuarvot kuitenkin pysyvät vakioina. Ajasta riippuva laskenta toimii lähinnä verrokkina, jonka avulla tuetaan toisen laskutavan tulosten pätevyyttä. Jokaisen 10 vyöhykkeen poistoilman epäpuhtauspitoisuus laskettiin kaavasta

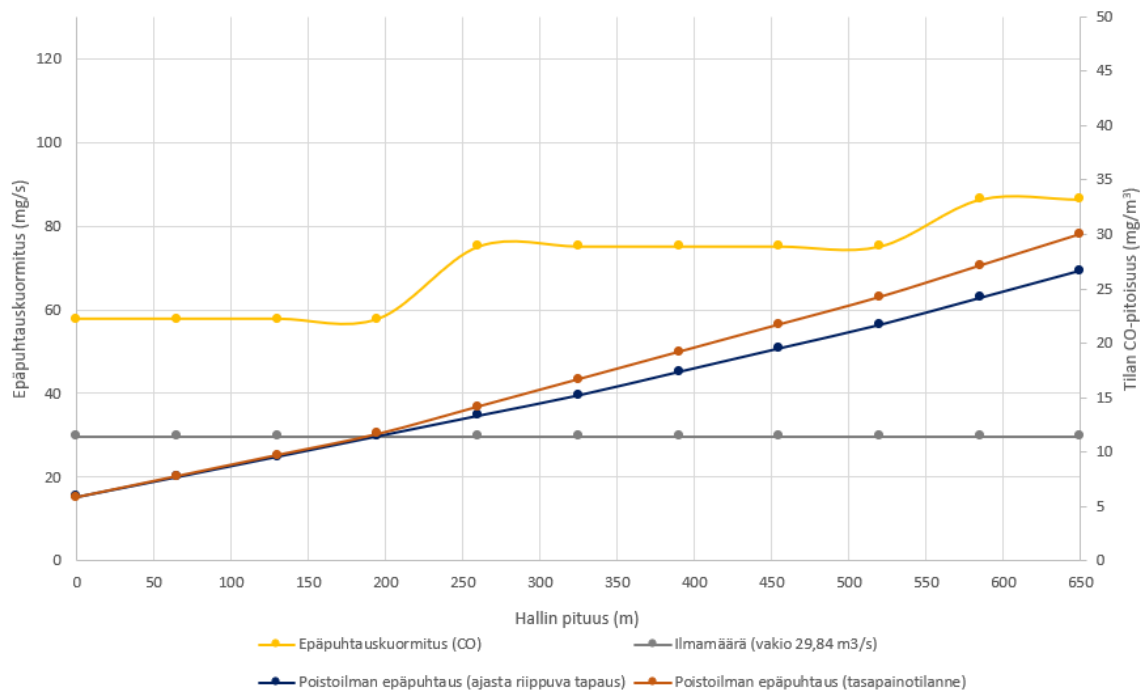
$$C(t) = C_u \cdot e^{-nt} + \left(C_u + \frac{G}{q_v}\right) \cdot (1 - e^{-nt}) \quad (2)$$

jossa

$C(t)$	on poistoilman epäpuhtauspitoisuus ajan hetkellä t (cm^3/m^3)
C_u	on tuloilman epäpuhtauspitoisuus (cm^3/m^3)
n	on ilmanvaihtokerroin ($1/\text{h}$)
G	on moottoriajoneuvosuojaan epäpuhtauskuormitus (cm^3/s)
q_v	on poistoilmavirta (m^3/s).

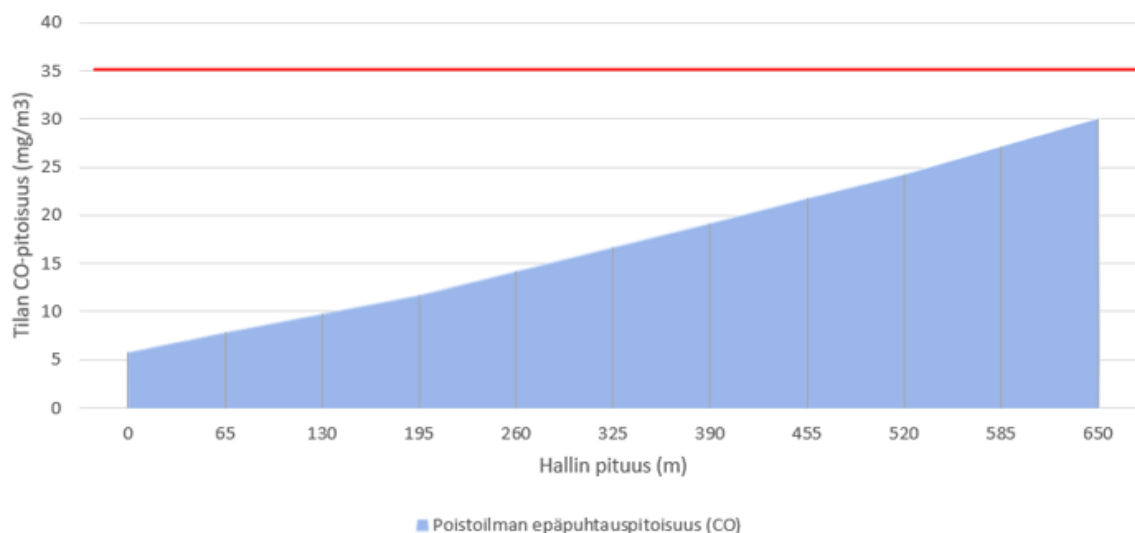
Oletettiin, että epäpuhtaudet sekoittuvat jokaisen alueen ilmassaan 1/10 tunnin ajan eli 6 minuuttia, minkä jälkeen muodostunut poistoilman epäpuhtauspitoisuus siirtyy seuraavan alueen tuloilman epäpuhtauspitoisuudeksi. Tällöin laskelman kokonaiskesto on yhden tunnin eli mitoitusajanjakson mittainen. Ajasta riippuvassa tapauksessa tilavuudella on huomattava merkitys tilan epäpuhtauspitoisuuden kehittymiseen (Sandberg

2014b: 102). Eroavaisuus nähdään myös tuloksista, joita havainnollistaa kuvan 9 sininen käyrä.



Kuva 9. Ruuhkahuipputunnin poistoilman CO-epäpuhtauspitoisuus hallin koko pituudella lasketuna ajasta riippuvassa tapauksessa ja tasapainotilanteessa, ilmavirralla 2,7 l/s/m².

Yhteenvedosta nähdään, että molemmilla laskentatavoilla 650 metrin kohdalla poistoilman epäpuhtauspitoisuus on alle tavoitearvon 35 mg/m³: tasapainotilan haulla 30 mg/m³ ja ajasta riippuvassa tapauksessa 26,7 mg/m³. Voidaan siis todeta, että pinta-alaperusteinen ilmavirta 2,7 l/s/m² on riittävä (kuva 10), mutta myös ylivoimainen. Huomionarvoista on, että kohdissa 250 ja 600 metriä tapahtuneet keskimääräisen epäpuhtauskuormituksen korotukset eivät juuri näy kummankaan laskutavan poistoilman epäpuhtauksien käyrissä, vaan ne jatkavat kasvuaan lähes lineaarisesti. Ajoyhteyksien painotus näkyy toki kokonaisepäpuhtauspitoisuudessa ja täten hallin loppuosan poistoilman epäpuhtauden kasvuna, mutta itse ajoyhteyksien kohdalla muutosta käyrissä ei havaita. Molemmat käyrät ovat 200 metriin asti yhteneväisiä, mutta sen jälkeen aikariippuvan tilanteen käyrä antaa tilan epäpuhtauspitoisuudeksi hieman matalampia arvoja. Tämä johtuu tilan geometrian vaikutuksesta. Pitkässä hallissa edettäessä tilavuuden merkitys korostuu, eivätkä epäpuhtaudet ehdi sekoittua täydellisesti ajasta riippuvan laskutavan vyöhykkeissä, joille määriteltiin 6 minuutin tarkasteluväli.

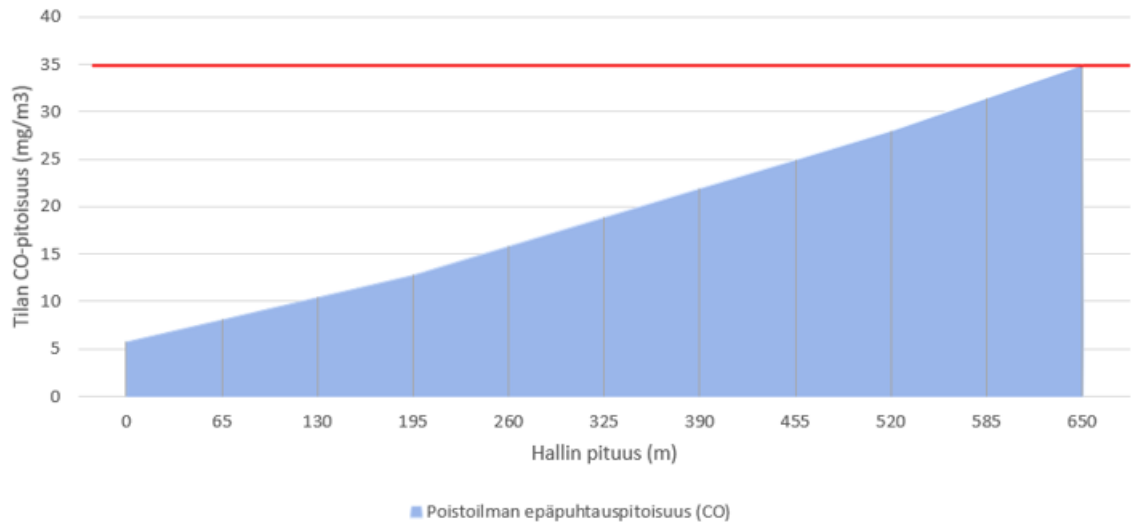


Kuva 10. Poistoilman epäpuhtauspitoisuus ilmanvaihdon mitoituksella 2,7 l/s/m². Punainen viiva havainnollistaa raja-arvoa 35 mg/m³.

Seuraavaksi lasketaan epäpuhtauskuorman perustuva ilmanvaihtomitoitus, jolla määritetään hallin optimaalinen ilmavirta. Tarkempi ilmanvaihtomitoitus päätetään toteuttaa tasapainotilan haulla, jotta vältetään ilmanvaihdon alimitoitukselta. Myös ympäristöministeriön mitoitussopas ohjeistaa poistoilmavirran laskemiseen epäpuhtauskuorman tasapainotilanteessa, jolloin tilaan tuleva ja siellä muodostuva epäpuhtauspitoisuus on yhtä suuri kuin tilasta lähtevä. Kontkasan (2021) mukaan epäpuhtauslähteiden hankalan mallintamisen vuoksi myös niiden muodostuminen voidaan ajatella esimerkiksi 0,5 metrin korkeudella olevaksi ”epäpuhtauspatjaksi”, joka tuottaa tyhjään halliin koko pinta-alalle joka paikkaan saman epäpuhtauskuormituksen. Tällöin mallintamisessa voidaan hyödyntää tasapainotilan haun menetelmää.

Aiemmista laskuista saadaan koko tilan keskimääräiseksi kokonaisepäpuhtauskuormitukseksi 2 599 g/tunti eli 722 mg/s. Tämä ottaa huomioon sekä lisätyn 10 %:n varmuusmarginaalin, että ajoyhteyksien tuoman laskennallisen lisäpäästökuorman. Tuloilman epäpuhtauspitoisuutena käytetään aiemmin laskettua lämmöntalteenoton huomioon otettavaa 5,9 mg/m³ ja poistoilman epäpuhtauspitoisuutena raja-arvoa 35 mg/m³. Ilmavirta ratkaistaan kaavasta 1. Tulokseksi saadaan 24,8 m³/s, joka tarkoittaa pinta-alaperusteisesti 11 000 m²:n hallissa ylöspäin pyöristettynä ilmavirtaa 2,3 l/s. Tällä ilmavirralla poistoilman epäpuhtauspitoisuutena saadaan 34,9 mg/m³ (kuva 11), joka alittaa mitoitussopaan raja-arvon. Epäpuhtauskuormituksen perusteella laskettuna ilmavirta on

neliömetriperusteista mitoitusta 17 % pienempi. On kuitenkin tärkeää noudattaa harkitsevuutta, kun maanalaisten tilojen ulkoilmavirta suunnitellaan ohjearvoa pienemmäksi. Liitteessä 1 on tarkempi yhteenveto epäpuhtaus- ja mitoituskalkulaista.



Kuva 11. Poistoilman epäpuhtauspitoisuus ilmanvaihdon mitoituksella 2,3 l/s/m². Punainen viiva havainnollistaa raja-arvoa 35 mg/m³.

Epäpuhtauskuormitukseen perustuvan ilmanvaihdon kokonaisuuden on täytettävä tietyt vaatimukset. Paikallinen rakennusvalvontaviranomainen voi hyväksyä neliömetripohjaista mitoitusta pienemmät ilmavirrat seuraavin ehdoin:

- Ilmanvaihdon mitoitus on laadittu ja raportoitu asianmukaisesti, ja siitä käy ilmi varautuminen poikkeustilanteisiin.
- Tilassa on oltava vähintään 1 kpl epäpuhtauden mittausantureita 500 m²:ä kohden. Niiden tulee olla säännöllisesti tarkastettuja ja sijoitettu oletettuihin suurimman CO-pitoisuuden kohtiin.
- Ilmanvaihdon tulee olla ohjattavissa tarpeenmukaisesti eri epäpuhtauspitoisuuksilla. Sen täytyy toimia täydellä teholla, kun CO-pitoisuus ylittää 58 mg/m³ ja antaa hälytys, kun CO-pitoisuus ylittää 81 mg/m³.
- Mikäli tilassa ei ole nimettyjä ajoneuvopaikkoja, tulee käytössä olla nykyaikainen liikenneohjausjärjestelmä.

- Kun CO-pitoisuus ylittää hälytysrajan 81 mg/m^3 , sisäänajo tilaan täytyy pystyä estämään. Tästä aiheutuva mahdollinen ruuhkautuminen on huomioitava liikennesuunnitelmassa.
- Jos 15 minuutin keskiarvo-CO-pitoisuus ylittää 87 mg/m^3 , oleskelu tilassa pitäisi pystyä estämään. (Moottoriajoneuvosuojaan ilmanvaihdon mitoitusopas 2018.)

5 Yhteenveto ja pohdinta

Insinööriyö aloitettiin selvittämällä kalliopysäköintilaitoksille ominaiset ilmanvaihdon ja savunpoiston ratkaisut ja niiden mitoistavat. Tämän jälkeen tutkittiin, mitä vaikutuksia sähköajoneuvojen ja niiden tarvitsemien latauspaikkojen yleistyminen tuo maanalaisten tilojen käyttö- ja paloturvallisuuteen. Tutkimusta varten haastateltiin ja konsultoitiin useita alansa asiantuntijoita. Tällä tavoin saatiin kerättyä kattavasti teoriatietoa, jonka pohjalta voitiin keskittyä päätutkimuskysymykseen eli Keilaniemeen valmistuvan kalliopysäköintilaitoksen ilman epäpuhtauspitoisuuden määrittämiseen ja siihen perustuvaan ilmanvaihdon mitoittamiseen.

Kokonaiskustannuksiltaan kalliopysäköintitilojen parhaimmaksi ilmanvaihdon ratkaisuksi osoittautui viimeisen 10–15 vuoden aikana nopeasti yleistynyt suuntapainepuhaltimien varustettu pitkittäisilmanvaihto. Tämän helppo päälle/pois-tyyppinen säädettävyyden ja tilantarpeen joustavuus tekevät niistä perinteisiä kanavoinneilla toteutettuja järjestelmiä monikäyttöisempiä. Kanavoituna ilmanvaihdosta saadaan mahdollisesti hallitumpi ja tarkempi, mutta myös kalliimpi, joten se sopii paremmin pienempiin kohteisiin. Suuntapainepuhallinjärjestelmän etuna on myös se, että samoja puhaltimia voidaan hyödyntää tilan savunpoiston järjestämisessä. Tilan paloturvallisuutta suunniteltaessa tulee keskittyä kohdekohtaiseen kokonaisuuteen, ja usein varsinkin suuremmissa kohteissa savunpoisto mitoitetaan toiminnallisia palosimulointeja hyödyntäen. Ilmanvaihdon mitoituksessa ja ohjauksessa yksi tärkeimmistä huomioitavista asioista on kosteuden hallinta: kesäaikana kalliotilan sisäänpuhallusilmaa on lähes välttämätöntä kuivata, mikä edellyttää tuloilman jäähdytystä.

Liikenteen sähköistymistä tutkittaessa saatiin selville, että tämänhetkisten tietojen mukaan sähköautojen yleistymisen vaikutus savunpoiston ja ilmanvaihdon mitoittamiseen on pieni. Niiden aiheuttama palokuorma ei eroa merkittävästi polttomoottorikäyttöisistä, ja joissakin tutkimuksissa on saatu jopa matalampia palokuormamääriä. Asia vaatii toki enemmän tutkimusta ja myös lisäpäättöksiä viranomaistahoilta. Tällä hetkellä asetus rakennusten paloturvallisuudesta ei huomioi sähköautojen paloriskiä tai niiden vaikutusta tilan rakenteelliseen paloturvallisuuteen.

Helsingin kaupungin pelastuslaitoksen palomestari Suosalo (2021) ei koe suureksi ongelmaksi sähköautopaikkojen kasvavaa määrää uusissa kalliopysäköintilaitoksissa, kunhan tämä otetaan huomion varhaisessa vaiheessa palo- ja kokonaissuunnittelua. Palolaitoksen kannalta suurimmat sähköajoneuvojen maanalaisiin paloihin liittyvät haasteet ovat pitkät etäisyydet kalliotiloissa ja autojen akustojen sammuttaminen. Tällä hetkellä selvästi eniten käytössä olevien litiumioniakkujen ominaispiirteisiin kuuluu lämpökarkaimiseksi kutsuttu ilmiö, jossa akun sisäiset kemikaalit hajoavat ja alkavat lämmetä voimakkaasti. Erityisiä haasteita luo se, että akku tuottaa itsenäisesti tarvittavan lisähapen ja saattaa syttyä pitkällä viiveellä tai jopa uudestaan kerran sammuttuaan.

Insinööriyön yksi tärkeä tavoite oli selvittää Keilaniemen kalliopysäköintilaitoksen yli 600 metriä pitkän pysäköintihallin ilmanlaadun säilyvyys Ympäristöministeriön julkaiseman moottoriajoneuvosuojan ilmanvaihdon mitoitusoppaan määrittämässä raja-arvoissa. Tätä varten suoritettiin aluksi tilan sisäisen epäpuhtauskuormituksen määrittäminen. Tässä käytettiin apuna em. mitoitusopasta, ulkopuolisen tahon toimesta aiemmin laadittua liikenneennustetta sekä muita asiantuntijakontakteja. Tätä tietoa käytettiin ilmanvaihdon mitoituksen perusteena. Keskimääräisen epäpuhtauskuormituksen oletettiin jakautuvan tasaisesti koko hallin matkalle, ja samoin ilmavirran oletettiin säilyvän vakiona. Neliömetripohjainen mitoitus ($2,7 \text{ l/s/m}^2$) osoittautui ylivoimiseksi, joten haluttiin selvittää optimaalisempi ilmavirta. Vähimmäisulkoilmavirraksi laskettiin $24,8 \text{ m}^3/\text{s}$ eli noin $2,3 \text{ l/s/m}^2$. Tämä tuodaan tilaan suuresta tuloilmasäleiköstä mahdollisimman matalalla lähtönopeudella, jolloin varmistetaan korkea ilman vaihtuvuus, lämpötilatehokkuus ja epäpuhtauksien poistotehokkuus. Maanalaisten tilojen savunpoiston periaatetta ja mitoitusta käytiin läpi, mutta Keilaniemen kalliopysäköintilaitoksen osalta tarkempia mitoituksia ei tehty.

Kokonaisuudessaan työssä onnistuttiin hyvin täyttämään sille asetetut tavoitteet. Luotiin kattava katsaus tämänhetkisiin kalliopysäköintitilojen ilmanvaihdon ja savunpoiston teknisiin ratkaisuihin kuin myös sähköajoneuvojen paloturvallisuuteen, monipuolisesti eri tutkimusaineistoa ja asiantuntijoita hyödyntäen. Samalla saatiin Keilaniemen pysäköintilaitokseen toivottua ilmanlaatuun ja ilmanvaihtoon liittyvää tutkimustietoa, jota työn toimeksiantaja Ramboll pystyy hyödyntämään rakennushankkeen edetessä. Hankin itseleni hyvän tietopohjan liittyen maanalaisten pysäköintitilojen ominaispiirteisiin ja teknisiin ratkaisuihin, mitä saan hyödynnettyä jatkossa eri suunnitteluprojekteissa.

Lähteet

7900 sähköautoa tieliikenteeseen rekisteröitynä Suomessa Q3/2020. Verkkoaineisto. Autotie.fi. <<https://www.autotie.fi/tien-sivusta/sahkoautoileva-motoristi/7900-sahkoauto-tieliikenteeseen-rekisteroityna-suomessa-q32020>>. 19.10.2020. Luettu 31.1.2021.

Components for smoke and heat control systems. 2006. Part 7: Code of practice on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat control systems for covered car parks. BS 7346–7:2006. British Standard.

Enright, Tony. 2013. Impact of jet fan ventilation systems on sprinkler activation. Case studies in Fire Safety 1 (2014) 1–7. Elsevier.

Hokkanen, Niko. 2015. Pysäköintihallin ilmanvaihto suuntapainepuhaltimilla. Opinnäytetyö. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Kalliotilat. 1998. RT 91-10655. Rakennustieto Oy.

Kalliotilojen ilmastointilaitosten käyttöohje. 1997. RIL 213-1997. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Katajanokan pysäköintilaitos. 2014. Verkkoaineisto. Hel.fi. <https://www.hel.fi/hel2/ksv/liitteet/2014_kaava/0796_1_raportti.pdf>. 22.8.2014. Luettu 31.1.2021.

Keilaniemeen suunnitellaan kalliopysäköintilaitosta. 2020. Verkkoaineisto. Espoo.fi. <[https://www.espool.fi/fi-FI/Asuminen_ ja_ ymparisto/Kaavoitus/Asemakaava/Asemakaavoituskohteet/Tapiola/Keilaniemen_kalliopysakointilaitos_920400/Keilaniemeen_suunnitellaan_kalliopysakoi\(179838\)](https://www.espool.fi/fi-FI/Asuminen_ ja_ ymparisto/Kaavoitus/Asemakaava/Asemakaavoituskohteet/Tapiola/Keilaniemen_kalliopysakointilaitos_920400/Keilaniemeen_suunnitellaan_kalliopysakoi(179838))>. 6.5.2020. Luettu 8.1.2021.

Keilaniemen kalliopysäköintilaitos. 2020. Liikenne-ennuste ja toimivuustarkastelut, luonnos. 4.5.2020. Sitowise.

Kontkanen, Antti. 2021. Sales Manager Smoke Control Solutions, Sodeca Finland Oy, Helsinki. Puhelinkeskustelu 15.2.2021.

Laki rakennusten varustamisesta sähköajoneuvojen latauspisteillä ja latauspistevalmiuksilla sekä automaatio- ja ohjausjärjestelmillä. 2020. 733/29.10.2020.

Lampi, Juha. 2017. Maanalainen rakentaminen rakennetun ympäristön täydentäjänä. Verkkoaineisto. Rakentajain kalenteri 2017. <https://www.rakennustieto.fi/material/attachments/rakentajain_kalenteri/RhAQBudrf/Lampi_taydennysrakentaminen.pdf>. 2017. Luettu 8.2.2021.

Liikenteen vaihtoehtoisten käyttövoimien jakeluinfra. Kansallisen ohjelman seuranta. 2019. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 2020:2.

Lähdetluoma, Markku. 2020. Tuleen syttynyt sähköauto on vaikea sammuttaa: palokunta kehitti itse ongelmaan ratkaisun, jossa akku upotetaan veteen. Verkkoaineisto. Yle.fi. <<https://yle.fi/uutiset/3-11341995>>. 12.5.2020. Luettu 31.1.2021.

Maanalaisten tilojen paloturvallisuussuunnitelma, perusteet ja soveltamisohjeet. 2007. RIL 233-2007. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

Maanalaisten toimintojen yleinen turvallisuus selvitys. 2006. Verkkoaineisto. Helsingin kaupunki, Kaupunkisuunnitteluvirasto. <https://www.hel.fi/hel2/ksv/Aineistot/maanalaisten/Maanalaisten_toimintojen_yleinen_turvallisuus selvitys.pdf>. Luettu 31.1.2021.

Moottoriajoneuvosuojaan ilmanvaihdon mitoitusopas. 2018. Laskentaopas. Helsinki: ympäristöministeriö.

Muuttuva rakennettu ympäristö ja uudet teknologiat. 2020. Paloturvallisuus ja riskienhallinta. Verkkoaineisto. Spek.fi. <https://issuu.com/spek_ry/docs/muuttuva_rakennettu_ymparisto_toukokuu_2020?fr=sYWVhYTE0NDkxOTU>. Luettu 15.1.2020.

Pelastustyöntekijöiden opas. 2019. Model 3. Verkkoaineisto. Tesla.com. <https://www.tesla.com/sites/default/files/downloads/Model_3_Emergency_Response_Guide_fi.pdf>. Luettu 30.1.2021.

Pohjapiirustus. 2021. Keilaniemen pysäköintilaitos. 11.2.2021, luonnos. Sitowise.

Poikkileikkauskuva. 2020. Keilaniemen pysäköintilaitos. 23.10.2020, luonnos. Sitowise.

Pysäköintilaitokset. 2016. RT 98-11237. Rakennustieto Oy.

Rakennusten savunhallinta ja savunpoistolaitteistojen kunnossapito. 2019. RTS 19:58. Rakennustieto Oy.

Rakennusten savunhallinta: suunnittelu, toteutus ja ylläpito. 2020. RIL 232-2020. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D2. Helsinki: ympäristöministeriö.

Salmi, Timo. 2020. Rakenteellinen paloturvallisuus ja savunpoiston periaatteet. Luentomateriaali. Metropolia Ammattikorkeakoulu.

Sandberg, Esa. 2014a. Ilmastointilaitoksen mitoitus, ilmastointitekniikka osa 2. Tampere.

Sandberg, Esa. 2014b. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät, ilmastointiteknikka osa 1. Tampere.

Savunpoisto rakennuksista. 2015. Helsingin rakennusvalvontaviraston ohje. Verkkoaineisto. Helsingin kaupungin rakennusvalvontavirasto. <<https://www.hel.fi/static/rakvv/ohjeet/Savunpoisto.pdf>>. Luettu 20.1.2021.

Savunpoiston tarkoitus. Verkkoaineisto. Lapinpelastuslaitos.fi. <<http://www.lapinpelastuslaitos.fi/onnettomuuksien-ehkaisy/yrityksille/palotekniset-laitteet/savunpoisto>>. Luettu 20.1.2021.

SFS 7025. 2010. Savunpoistopuhaltimille eri käyttökohteissa vaadittavat ominaisuudet ja niille asetetut vaatimustasot. Helsinki. Suomen Standardisoimisliitto.

Suosalo, Joonatan. 2021. Palomestari, Helsingin kaupungin pelastuslaitos. Puhelinkeskustelu 3.3.2021.

Sähköautojen ja niiden latauspisteiden paloturvallisuudesta. 2020. Verkkoaineisto. Asianajotoimisto Lexia. <<https://isli.lexia.fi/sahkoautojen-ja-niiden-latauspisteiden-paloturvallisuudesta/>>. 26.6.2020. Luettu 30.1.2021.

Sähköisten ajoneuvojen vakuuttamisen toimintaympäristö - nykytila ja lähitulevaisuus. 2019. Verkkoaineisto. Gaia Consulting Oy. <<https://www.lvk.fi/templates/vinha/services/down-load.aspx?fid=411467&hash=4b2fe6db06b29dd80a1943464c11fa68082d707eec5e0c81bd6f8549c9c43c06>>. Luettu 31.1.2021.

Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta. 2017. 848/28.11.2017.

Moottoriajoneuvosuojan ilmanvaihdon mitoitus epäpuhtauspitoisuuden mukaan

Moottoriajoneuvosuojan ilmanvaihdon mitoitustaulukko			
Kohde	Keilaniemen pysäköintilaitos		
	P1-taso, yksi halli		
Laatija	Sami Niemi		
Päivämäärä	25.2.2021		
Moottoriajoneuvosuojan sisäilman epäpuhtauskuormituksen määrittäminen			
Alueen pinta-ala	11050	m ²	
Tilavuus	57590	m ³	
Autopaikkoja	400	kpl	
Lähtävä liikenne	117	kpl	<i>huipputuntina, sähköautot vähennetty</i>
Saapuva liikenne	18	kpl	<i>huipputuntina, sähköautot vähennetty</i>
Sähköautojen osuus	5 %		<i>arvioidusti vuonna 2025</i>
Mit. lämpötila talvella	12	°C	
Käyttötarkoitus	toimisto-/liikerakennus		
Mitoitusperuste	Iltahuipputunti (IHT)		
Arvioitu pysäköinti-aika	yli 2	h	
Mitoitettava epäpuhtaus	hiilimonoksidi (CO)		
CO-mitoituskriteeri	35	mg/m ³	<i>tuntikeskiarvon sallittu maksimi</i>
Ulkoilman CO-pitoisuus	4	mg/m ³	<i>HSY:n vuoden 2014 mittaus</i>
Käynnistys			
Määrä	117	kpl	
Epäpuhtaus	15	g	
Yhteensä	1755,6	g/tunti	
Sisäänajo tasaisella			
Määrä	35	kpl	<i>ml. läpiajo viereiseen halliin</i>
Pituus	350	m	<i>arvio pohjakuvasta</i>
Epäpuhtaus	0,001	g/m	
Yhteensä	12,4	g/tunti	
Ulosajo tasaisella			
Määrä	234	kpl	<i>ml. läpiajo viereiseen halliin</i>
Pituus	350	m	<i>arvio pohjakuvasta</i>
Epäpuhtaus	0,0012	g/m	
Yhteensä	98,3	g/tunti	
Tyhjäkäynti			
Aika	0,5	min	<i>YM:n oppaan oletama</i>
Määrä	234	kpl	
Epäpuhtaus	0,2	g/min	
Yhteensä	23,4	g/tunti	
Epäpuhtaudet yhteensä	2078,7	g/tunti	<i>varmuusmarginaali +10%</i>
	2599,4	g/tunti	<i>ajoyhteydet painotettu</i>
	722,1	mg/s	
	45,1	mg/m ³	
Poistoilmamäärä	24,8	m ³ /s	<i>LTO:n vaikutus huomioitu</i>
	2,24	l/s/m ²	
	-17 %		<i>verrattuna m²-perusteiseen 2,7 l/s/m²</i>