

Anne Koskenkangas

**KORKEAN RAKENNUKSEN LVI-SUUNNITTELU JA PALOTUR-  
VALLISUUS**

# **KORKEAN RAKENNUKSEN LVI-SUUNNITTELU JA PALOTUR- VALLISUUS**

Anne Koskenkangas  
Opinnäytetyö  
Kevät 2020  
Talotekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Talotekniikan tutkinto-ohjelma

---

Tekijä: Anne Koskenkangas

Opinnäytetyön nimi suomeksi: Korkean rakennuksen LVI-suunnittelu ja paloturvallisuus

Opinnäytetyön nimi englanniksi: HVAC Design and Fire Safety in High-rise Building

Työn ohjaaja: Martti Rautiainen, Rauno Holopainen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2020

Sivumäärä: 72+1

---

Opinnäytetyön tavoitteena oli tarkastella korkean rakennuksen LVI-suunnittelun ja paloturvallisuuden erityisvaatimuksia. Työssä myös selvitettiin mitä korkeasta rakentamisesta säädetään lainsäädännössä ja määräyksissä kansallisesti ja kansainvälisesti. Lisäksi tuli havainnollistaa laskemalla korkeuden vaikutuksia eri järjestelmiin

Työ perustui määräyksiin ja kirjallisuusselvitykseen. Työssä tarkasteltiin lämmitys-, vesi-, viemäri-, sprinkleri- ja savunhallintajärjestelmien suunnittelun erityistarpeita. Laskentaesimerkeissä tarkasteltiin rakennuksen korkeuden aiheuttaman hydrostaattisen paineen vaikutuksia lämmitys- ja käyttövesijärjestelmiin. Lisäksi laskelmilla tarkasteltiin hormivaikutuksen ja tuulen vaikutusta paine-eroihin rakennuksessa. Savunhallinta- ja sprinklerijärjestelmistä käytiin läpi mitoitus-esimerkit.

Kirjallisuusselvityksen perusteella todettiin, että lainsäädännöissä ja määräyksissä ei aseteta erityisvaatimuksia koskien korkeaa rakentamista. Korkeiden rakennusten tulee täyttää samat rakentamismääräykset kuin muidenkin rakennusten. Paloturvallisuusmääräyksissä erityisvaatimuksia kuitenkin on. Laskelmien perusteella voidaan sanoa, että käyttövesiverkostossa tarvitaan paineenkorotusta, jotta veden paine on riittävä rakennuksen ylimmässä pisteessä. Alemmissä kerroksissa tarvitaan tällöin paineen alennusta. Lämmitysjärjestelmä vaatii välisiirtimiä, ettei järjestelmän suurin sallittu käyttöpaine ylity. Hormivaikutus ja tuuli vaikuttavat rakennuksen sisäisiin painesuhteisiin. Laskelmin osoitettiin, miten savunhallintajärjestelmiin lukeutuvalla paineistuksella pyritään estämään savun leviäminen poistumisteihin. Lisäksi laskelmien perusteella voidaan todeta, että tarkempi tarkastelu vaatii rakennuksen mallintamisen ja simuloinnin siihen tarkoitetulla ohjelmistolla.

---

Asiasanat: korkea rakentaminen, vyöhykejako, hydrostaattinen paine, painesuhteet, hormivaikutus, paloturvallisuus

# SISÄLLYS

|   |    |
|---|----|
| TIIVISTELMÄ                                       | 3  |
| SISÄLLYS  | 4  |
| 1 JOHDANTO  | 6  |
| 2 LAINSÄÄDÄNTÖ, MÄÄRÄYKSET JA PÄTEVYYSVAATIMUKSET | 7  |
| 2.1 Ulkomaiset määräykset                         | 8  |
| 2.2 Vaativuusluokat ja pätevyudet                 | 9  |
| 3 LÄMMITYSJÄRJESTELMÄT                            | 11 |
| 3.1 Lämmitysjärjestelmän vyöhykejako              | 12 |
| 3.2 Paisuntajärjestelmä                           | 15 |
| 3.3 Lämpölaajeneminen ja putkiston kannatus       | 16 |
| 4 KÄYTTÖVESI- JA VIEMÄRIJÄRJESTELMÄT              | 18 |
| 4.1 Vyöhykejako ja paineenkorotus                 | 18 |
| 4.2 Viemärijärjestelmät                           | 22 |
| 5 ILMANVAIHTOJÄRJESTELMÄT                         | 25 |
| 5.1 Toteutusvaihtoehdot                           | 26 |
| 5.2 Painesuhteiden hallinta                       | 28 |
| 5.3 Tuuli   | 29 |
| 5.4 Hormivaikutus                                 | 32 |
| 6 PALOTURVALLISUUS                                | 37 |
| 6.1 Paloluokat                                    | 37 |
| 6.2 Palo-osastointi                               | 38 |
| 6.3 Sprinklerijärjestelmät                        | 39 |
| 6.4 Savunhallinta                                 | 42 |
| 6.4.1 Painovoimainen savunpoisto                  | 43 |
| 6.4.2 Koneellinen savunpoisto                     | 44 |
| 6.4.3 Paineistus                                  | 46 |
| 7 ESIMERKKILASKELMAT                              | 48 |
| 7.1 Vyöhykejaon vaikutus käyttöveden paineeseen   | 48 |
| 7.2 Korkeuden vaikutus lämmityslinjaan            | 51 |
| 7.3 Tuulen vaikutus paine-eroihin                 | 51 |
| 7.4 Sprinklauksen mitoitus esimerkki              | 59 |

|  |    |
|--|----|
| 7.5 Paineistus   | 61 |
| 8 YHTEENVETO   | 64 |
| LÄHTEET  | 66 |
| LIITTEET   |    |
| Liite 1 Rakenneosien vuotoalakertoimia ja -pinta-aloja |    |

# 1 JOHDANTO

Suomen kaupungeissa rakentaminen on ollut tiivistä ja matalaa 2000-luvulle saakka, mutta 2010-luvulla suuret kasvukeskukset alkoivat kasvaa myös ylöspäin (1). Muualla maailmassa korkeita rakennuksia on rakennettu jo yli sadan vuoden ajan (2, s. 4.1). Tällä hetkellä Suomen korkein rakennus on Helsingin Kalasatamassa sijaitseva Majakka, jonka korkeus on 132 metriä, ja kerroksia on 35. Suurin osa korkeista rakennuksista sijaitsee Etelä-Suomessa, mutta korkeat rakennukset ovat alkaneet yleistymään myös muualla Suomessa. Esimerkkeinä voidaan mainita Tornihotelli Tampereella, Airiston Tähti Turussa ja Penttilänrannan puukerrostalo Joensuussa. (3) Oulun kaupungin korkeimpia rakennuksia ovat asuinkerrostalot Oulujoen Siltavahti, Oulun Puistovahti ja Satamarannan Masto. Suunnitteilla on lukuisia korkeita rakennuksia, kuten Pasilan 140 m ja 180 metriä korkeat tornitalot (4).

Korkealle rakennukselle ei ole vakiintunutta määritelmää. Helsingin kaupungin korkean rakentamisen selvityksen mukaan korkea rakennus on yli 56 metriä korkea tai yli 16 kerroksesta koostuva rakennus. Vastaavasti Tampereella korkea rakennus on vähintään 12-kerroksinen tai 35 metriä korkea. (4.) Oulussa puolestaan matalan rakennuskannan vuoksi korkeaksi rakentamiseksi määritellään jo vähintään yhdeksänkerroksiset tai julkisivultaan yli 27 metriä korkeat rakennukset (5). Korkean rakentamisen ja urbaanin elinympäristön neuvosto CTBUH (Council on Tall Buildings and Urban Habitat) määrittelee korkeaksi rakennukseksi yli 50 metriä korkean rakennuksen (6). ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) puolestaan luokittelee korkeaksi rakennukseksi vasta yli 91 metriä korkeat rakennukset (2, s. 4.1).

Korkeissa rakennuksissa talotekniikkaan kohdistuu erityisvaatimuksia. Rakennuksen korkeuden kasvaessa myös paloturvallisuuden vaatimukset kasvavat. Suunnittelussa tulee erityisesti ottaa huomioon lämmitys- ja käyttövesijärjestelmiin kohdistuva staattinen paine ja ilmanvaihtoon vaikuttava hormivaikutus. Staattisen paineen ja hormivaikutuksen kompensoimiseksi tekniikkaa voidaan sijoittaa rakennuksen välikerrokseen. Tässä opinnäytetyössä tehdään katsaus korkean rakennuksen LVI-suunnittelun erityispiirteisiin ja paloturvallisuuteen.

## **2 LAINSÄÄDÄNTÖ, MÄÄRÄYKSET JA PÄTEVYYSVAATIMUKSET**

Rakentamista säätelee maankäyttö- ja rakennuslaki (132/1999, MRL), joka määrittelee rakentamista koskevat yleiset edellytykset, tekniset vaatimukset sekä lupamenettelyn ja viranomaisvalvonnan. Rakentamisen tekniset vaatimukset koskevat rakenteiden lujuutta, paloturvallisuutta, terveellisyyttä, käyttöturvallisuutta, esteettömyyttä, ääniolosuhteita sekä energiatehokkuutta. Maankäyttö- ja rakennuslain mukaisesti rakennushankkeeseen ryhtyvän on huolehdittava siitä, että rakennus suunnitellaan ja rakennetaan siihen myönnetyn luvan sekä rakentamista koskevien säännösten ja määräyksien mukaan. (7.)

Maankäyttö- ja rakennuslain nojalla annetut tarkemmat rakentamismääräykset ja säännökset sekä ministeriön ohjeet on koottu ympäristöministeriön ylläpitämään Suomen rakentamismääräyskokoelmaan. Uudistetut rakentamista koskevat asetukset ovat olleet voimassa vuodesta 2018. Voimassa olevat uudet asetukset ovat Ympäristöministeriön asetus rakennusten vesi- ja viemärlaitteistoista 1047/2017, Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdesta 1009/2017, Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta 848/2017 ja Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017. Rakentamismääräyskokoelman määräykset ovat velvoittavia, kun taas ministeriön antamat ohjeet eivät ole, vaan muitakin ratkaisuja voidaan käyttää, jos ne täyttävät rakentamiselle asetetut vaatimukset. (8.)

Lain ja asetusten lisäksi rakentamista ja suunnittelua ohjaavat myös standardit ja erilaiset ohjeet. Standardit ovat yhteisesti sovittuja käytäntöjä, joiden tarkoituksena on parantaa yhteensopivuutta ja taata turvallisuus. Suomessa standardisoinnin keskusjärjestö on Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Suurin osa SFS-standardeista on alkuperältään EN-standardeja, jotka ovat eurooppalaisen standardisoinnisjärjestön CENin laatimia. Standardit ovat yleensä ohjeisiin rinnastettavia eivätkä siis aina sitovia. (9.) LVI-kortisto on Rakennustieto Oy:n ylläpitämä talotekniikka-alan tietokanta. LVI-kortisto koostuu säännöskorteista, ohjekorteista ja tuotekorteista, jotka sisältävät keskeiset tiedot ja ohjeet hyvään talotekniikan rakennustapaan ja suunnitteluun. (10.)

Korkean rakentamisen erityisvaatimuksiin otetaan hyvin rajallisesti kantaa rakentamismääräyksissä. Korkeaa rakentamista ei juurikaan säädöksissä mainita. Kuitenkin kaikki annetut rakentamismääräykset ja säännökset koskevat myös korkeaa rakentamista. Tässä työssä rakentamismääräyksen asetuksia ja ohjeistuksia on käsitelty tarkemmin kunkin järjestelmän kohdalla.

## **2.1 Ulkomaiset määräykset**

ASHRAEn teknisen komitean 9.12 mukaan korkea rakennus on rakennus, jonka korkeus ylittää 91 metriä. NFPA:n standardi 101 ja standardi 5000 eivät määrittele korkeaa rakennusta sinänsä mutta sisältävät lisävaatimuksia yli 128 metriä korkealle rakennukselle. IBC:n määritelmän mukaan rakennus on korkea, mikäli kerroksen lattian korkeus on 22,86 m korkeammalla kuin taso, jolle palokunnan paloautolla ylletään. (2, s. 4.1, 4.17.)

Yleisesti rakennusmääräykset vaihtelevat paljonkin maittain ja maiden sisällä. Esimerkiksi Yhdysvalloissa on omat rakennusmääräyksensä Kalifornian osavaltiossa ja New Yorkin alueille (11, s. 181). Rakennusmääräyksissä itsessään on hyvin niukasti tarkkoja ohjeistuksia korkeista rakennuksista. Korkeita rakennuksia siis koskevat hyvin pitkälti samat määräykset kuin muitakin rakennuksia. Tyypillisimmin viittaukset korkeaan rakennukseen löytyvät paloturvallisuusmääräyksiin liittyen (2, s. 4.17; 12, s. 5:22). Korkeissa rakennuksissa tulee toteutua määräysten vaatimukset terveellisyydestä, käyttöturvallisuudesta, paloturvallisuudesta, esteettömyydestä ja muista ominaisuuksista. Rakennuksen korkeus aiheuttaa haasteita vaatimusten toteuttamiseen. (13.)

REHVA, eli The Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations, kehottaa huomioimaan korkean rakennuksen suunnitteluohjeistuksessaan vaihtuvat sääolosuhteet, hormivaikutuksen, sisäilmaston laadun, käyttövesiverkoston staattisen paineen, rakennuksen energiatehokkuuden ja turvallisuusjärjestelmät (14).

## 2.2 Vaativuusluokat ja pätevydet

Maankäyttö- ja rakennuslain 120 d §:ssä ja 120 e §:ssä määritetään suunnittelu-tehtävien vaativuusluokat ja suunnittelijoiden kelpoisuusvaatimukset. Ympäristöministeriö on laatinut ohjeistuksen asetuksien soveltamisen tueksi. (15; 16) Suunnittelutehtävien vaativuusluokkia on neljä. Vaativuusluokkia ovat vähäinen suunnittelutehtävä, tavanomainen suunnittelutehtävä, vaativa suunnittelutehtävä ja poikkeuksellisen vaativa suunnittelutehtävä. Vaativuusluokka määräytyy muun muassa suunnittelutehtävän toiminnallisten ja teknisten vaatimusten, rakennuksen ja tilojen käyttötarkoituksen, rakennuksen koon sekä suunnittelu-, laskenta- ja mitoitusmenetelmien perusteella. (7.)

Ympäristöministeriön ohjeessa on määritelty vaativaksi rakennussuunnittelutehtäväksi esimerkiksi yli kaksikerroksinen ja kerrosalaltaan yli 300 neliömetrin suuruinen rakennus. Poikkeuksellisen vaativiksi rakennussuunnittelutehtäviksi on määritelty esimerkiksi yli 16-kerroksiset rakennukset. Rakennusvalvontaviranomainen määrittelee pätevyyden tapauskohtaisesti. (15.)

LVI-suunnittelutehtävien vaativuusluokat määräytyvät teknisten ja toiminnallisten vaatimusten, rakennuksen koon, käyttäjämäärän ja käyttötarkoituksen mukaan. Sekä ilmanvaihdon että kiinteistön vesi- ja viemäri-laitteiston suunnittelutehtävät ovat vaativia, jos kohde on yleensä yli kolmikerroksinen asuinrakennus tai yli kaksikerroksinen liike-, toimisto- tai teollisuusrakennus tai rakennus, jolla on useita käyttötarkoituksia. Ilmanvaihdolla tai vesi- ja viemärijärjestelmällä voi olla korkeat tekniset tai toiminnalliset vaatimukset esimerkiksi rakennuksen arkkitehtonisten ratkaisujen vuoksi tai energiatehokkuuden, äänitekniikan tai paloturvallisuuden vuoksi. (15.)

Ilmanvaihdon ja kiinteistön vesi- ja viemäri-laitteiston suunnittelutehtävät ovat poikkeuksellisen vaativia, jos rakennuksen erityisluonteesta aiheutuu poikkeuksellisen korkeita teknisiä tai toiminnallisia vaatimuksia. Poikkeuksellisen vaativiksi suunnittelutehtäväksi katsotaan myös sellaiset tehtävät, jos suunnittelu edellyttää uusien tai muutoin erittäin vaativien suunnittelu-, laskenta- tai mitoitusmenetelmien käyttöä. Käytännössä korkean rakennuksen LVI-suunnittelutehtävät ovat vaativuusluokaltaan aina vähintään vaativia suunnittelutehtäviä. (15.)

Paloturvallisuussuunnittelun pätevyyttä ei suoraan esitetä maankäyttö- ja rakennuslaissa, mutta lain erityismenettelyä koskevassa 150 d §:ssä se mainitaan. FISE Oy eli rakennus-, LVI- ja kiinteistöalalla toimiva henkilöpätevyksiä toteava yritys on laatinut maankäyttö- ja rakennuslain sekä sitä täydentävien asetusten ja Ympäristöministeriön ohjeiden periaatteiden mukaisesti vapaaehtoisen paloturvallisuussuunnittelijan pätevyyden. FISEn laatimat paloturvallisuussuunnittelun suunnittelutehtävien vaativuusluokat ovat tavanomainen, vaativa ja poikkeuksellisen vaativa. Poikkeuksellisen vaativaksi suunnittelutehtäväksi katsotaan esimerkiksi rakennus, joka on yli 16 kerrosta tai yli 50 metriä korkeudeltaan tai yli 8-kerroksinen puurunkoinen rakennus. (17.)

### 3 LÄMMITYSJÄRJESTELMÄT

Rakennuksen lämmitystehontarpeeseen vaikuttaa vallitseva ilmasto, rakennuksen koko ja korkeus, rakennusvaipan tiiveys ja ilmanvaihto. Lämmitystehontarve lasketaan yleensä huonekohtaisesti tai joukolle samanlaisia huoneita. Korkeille rakennuksille voidaan määritellä kerroskohtainen lämmitystehontarve, sillä rakennuksen keskimmaisilla kerroksilla lämpöhäviöt ovat samat lukuun ottamatta hormivaikutuksen aiheuttamaa lämpöhäviötä. Rakennuksen ylimmässä kerroksessa lämmitystehontarvetta lisäävät katon kautta aiheutuvat lämpöhäviöt, ja rakennuksen pohjakerroksessa lämpöhäviötä voivat lisätä esimerkiksi lämmittämätön maanalainen pysäköintitila sekä rakennuksen eteisaulat ja sisäänkäynnit. (18, s. 26.)

Hormivaikutuksen seurauksena rakennuksen alimpien kerrosten lämmitystehontarve on suurempi. Hormivaikutuksen aiheuttamat ilmapuodot riippuvat ensisijaisesti rakennusvaipan tiiveydestä. Hormivaikutuksen aiheuttamia lämpöhäviöitä voidaan kompensoida lisäämällä lämmityslaitteen lämmitystehoa jopa 20 % suunnitteluarvosta ja vastaavasti vähentämällä ylimpien kerrosten lämmitystehoa suunnitteluarvosta. (18, s. 27.)

Rakennuksen korkeus vaikuttaa lämmitysjärjestelmän teknisiin ratkaisuihin ja tilatarpeeseen. Staattinen paine kasvaa putkistossa ja lämmitysverkoston tilalaitteissa putkiston korkeuden kasvaessa. Verkoston paineen hallitsemiseksi lämmitysverkosto jaetaan pystysuuntaisiin vyöhykkeisiin ja verkostossa voidaan käyttää välisiirtimiä tai sijoittaa lämmönjakohuoneita kerroksiin. Vyöhykejako käytettäessä lämmitys rakennuksen muissa vyöhykkeissä ei lakkaa toimimasta, vaikka yhden vyöhykkeen verkostoon tulee häiriö. (19, s. 4.)

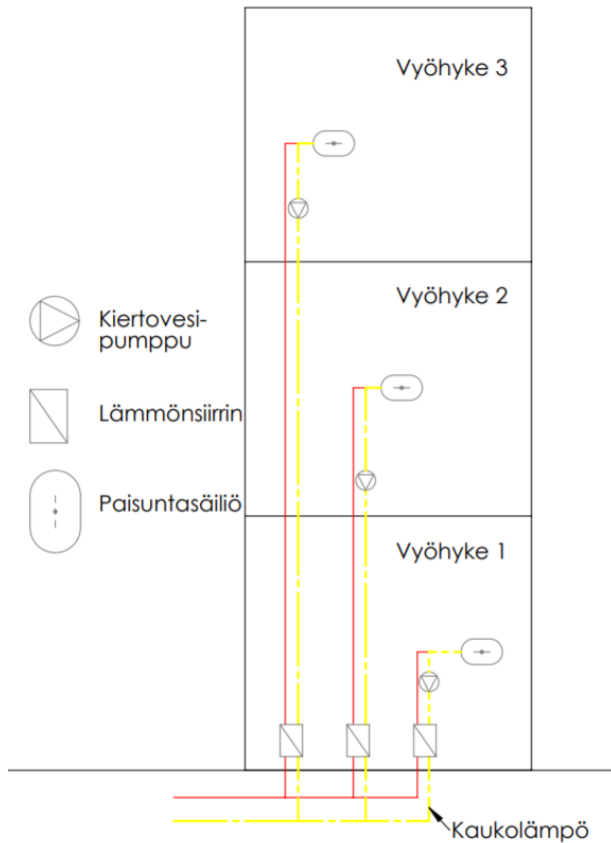
Lämmitysverkoston käyttöpaine määräytyy verkoston staattisen korkeuden perusteella. Staattinen paine muodostuu verkoston ylimmän laitteen ja paisuntaastian alapinnan välisestä korkeuserosta. (20.) Lämmitysverkoston laitteiden suunnittelupaine eli suurin käyttöpaine on kaukolämmityksen määräysten ja ohjeiden K1/2013 mukaisesti 6 baaria eli 600 kPa. Lämmitysverkoston käyttöpaine ylittää määräyksen mukaisen 600 kPa noin 60 metrin korkeudella. (21.)

Kaukolämpöputkia ei voida reitittää ylös kerroksissa sijaitseviin lämmönjakohuoneisiin kaukolämpöverkoston paineenvaihteluiden takia. Lämmönjakokeskus sijoitetaan rakennuksessa siten, että liittymisjohto kaukolämpöverkosta tekniseen laitetilaan on mahdollisimman lyhyt. Kaukolämpöjohtojen sijoittamista rakennuksen alle tai sisälle tulisi välttää. Käytännössä lämmönjakohuone sijaitsee rakennuksen kellarikerroksessa tai ensimmäisessä kerroksessa. (21.)

### **3.1 Lämmitysjärjestelmän vyöhykejako**

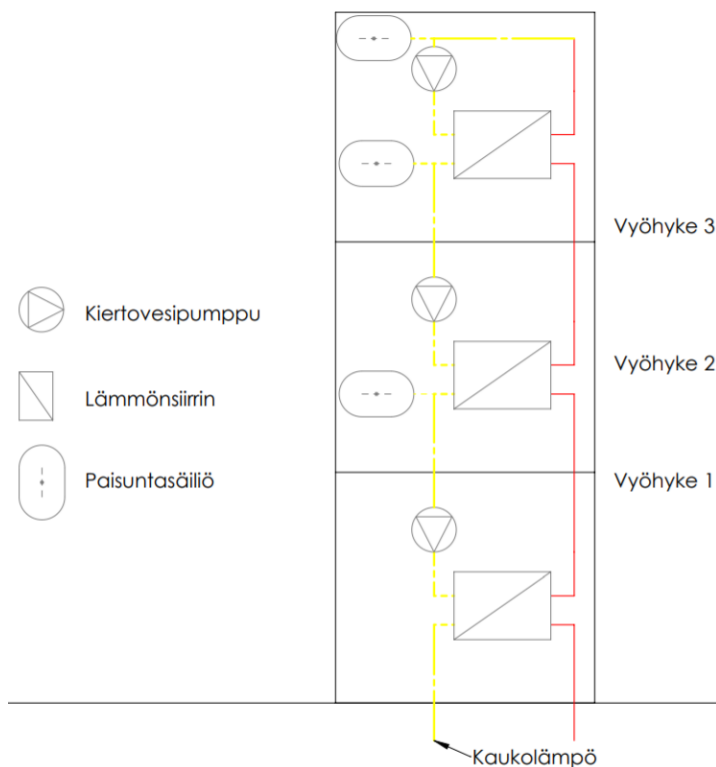
Lämmitysjärjestelmän vyöhykejako voidaan toteuttaa kolmella eri tavalla. Jokaiselle vyöhykkeelle voidaan sijoittaa oma lämmönsiirrin lämmönjakohuoneeseen ja tuoda pystynousut vyöhykkeille. Toinen vaihtoehto on erottaa vyöhykkeet niiden väliin sijoitettavilla välilämmönsiirtimillä. Kolmas vaihtoehto on käyttää yhtä korkeapainenousulinjaa, johon vyöhykkeet liitetään lämmönsiirtimillä. Yhteistä kaikille ratkaisuille on lämmönsiirtimien määrän moninkertaistuminen verrattuna mataliin rakennuksiin. (19, s. 4.)

Korkean rakennuksen lämmönjako voidaan toteuttaa sijoittamalla jokaisen vyöhykkeen lämmönsiirrin kellarikerrokseen lämmönjakohuoneeseen (kuva 1). Jokaiselle vyöhykkeelle tuodaan omat pystynousut lämmönjakohuoneesta kerrokseen. Tässä tapauksessa rakennuksen ylimpiä kerroksia palvelevat pystynousut toteutetaan korkeapainelinjoina. Noususuudella tulee käyttää materiaaleja, joiden paineenkesto on 16 baaria. (19, s. 5.)



**KUVA 1.** Vyöhykekohtainen nousulinja

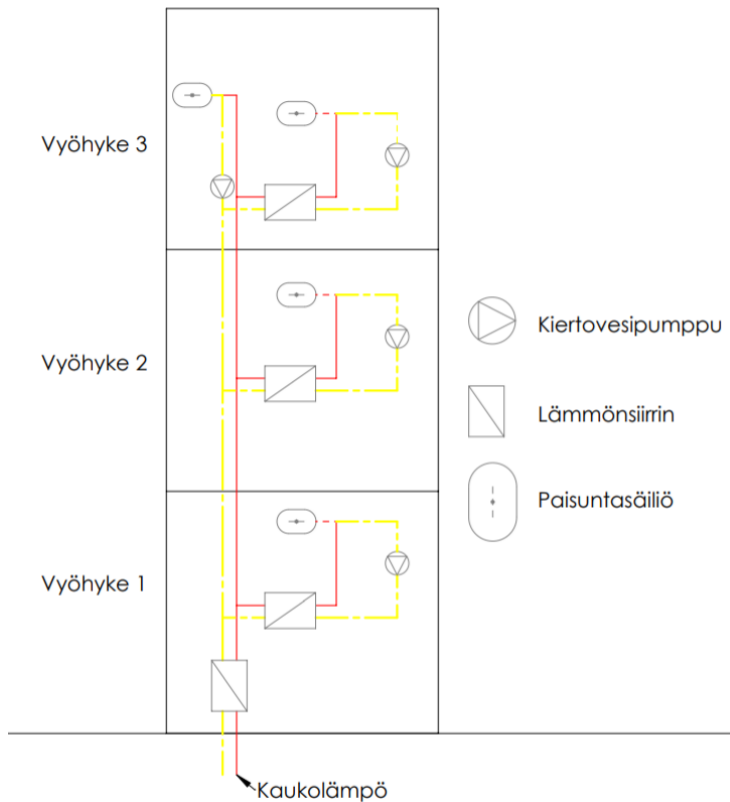
Lämmitysverkostossa voidaan käyttää väliverkostoja, joilla lämmitysenergia siirretään korkeammille vyöhykkeille (kuva 2). Väliverkostolla tarkoitetaan lämmityspiiriä, jossa kaukolämpöverkkoon kytketyltä lämmönsiirtimeltä lämmitysenergia siirretään korkeammalle kerroksiin seuraavalle lämmönsiirtimelle eli välisiirtimelle. Välisiirrin palvelee oman vyöhykkeensä lämmitysverkostoa. Välisiirrintapauksessa paikallinen energialaitos voi antaa luvan poiketa kaukolämpömääräyksien asettamista lämpötilatasoista, jotta menoveden lämpötila olisi riittävän korkea myös lämmitysverkoston välisiirtimessä. (19, s. 6.)



**KUVA 2. Väliverkostollinen lämmitysjärjestelmä**

Toisiinsa kytketyissä lämmitysverkostoissa tulee kiinnittää huomiota toimintalämpötiloihin ja virtausmääriin. Virtausmäärät voivat kasvaa verkostoissa suuriksi ja johtaa suuriin putkikokoihin. Lisäksi tulee kiinnittää huomiota vyöhykkeiden lämmitystehontarpeisiin, sillä lämmitystarpeet vyöhykkeiden kesken voivat olla erilaiset. Ensimmäisessä väliverkostossa tulee myös pitää jatkuva virtaus, jotta koko rakennuksen lämmitystarve täyttyy. (19, s. 7.)

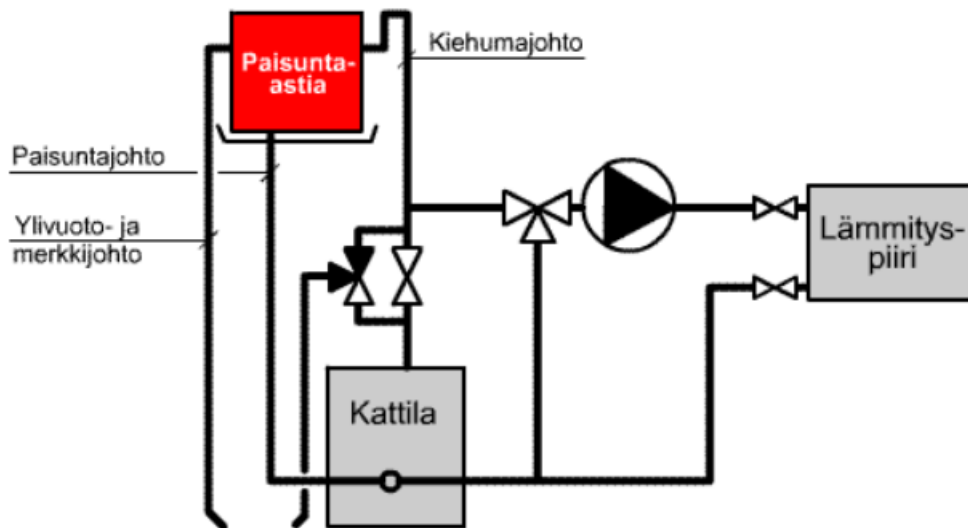
Korkeapaineinen nousulinja (kuva 3) lähtee rakennuksen lämmönjakohuoneesta ylimmän vyöhykkeen lämmönsiirtimille asti. Vyöhykkeiden lämmitysverkko liitetään lämmönsiirtimellä korkeapainenusupariin. Sama lämmitysverkko palvelee vyöhykkeen kaikkia huoneistoja. (19, s. 7.)



*KUVA 3. Korkeapaineisella nousulinjalla toteutettu lämmitysjärjestelmä*

### 3.2 Paisuntajärjestelmä

Veden lämpötilan muuttuessa myös veden tiheys ja tilavuus muuttuu. Koska putkisto ja sen varusteet eivät laajene samalla tavalla, lämmitysjärjestelmä tulee varustaa paisuntalaitteistolla (kuva 4), joka vastaanottaa veden laajenemisen. Paisuntajärjestelmä voi olla joko suljettu tai avoin. Suljettu paisuntajärjestelmä on paineellinen järjestelmä, jossa nestetilavuuden muutokset tapahtuvat paisuntasäiliön yläosassa olevaa kalvoa tai kumipussia vasten. Avoin järjestelmä on paineeton järjestelmä, jossa säiliöstä on yleensä avoin yhteys ulkoilmaan. Täysin avointa paisuntajärjestelmää ei kuitenkaan enää saa korroosiovaaran vuoksi asentaa uusiin tai uusittaviin lämmitysjärjestelmiin. (20.)



KUVA 4. Avoin paisuntajärjestelmä (22)

Suurissa järjestelmissä ja korkeissa rakennuksissa voidaan käyttää kompressorijä pumppuohjattuja paisunta-astioita. Kalvopaisunta-astiaan verrattuna kompressorijä pumppuohjatut paisunta-astiat ovat tilavuudeltaan pienempiä. Pumppuohjattu paisunta-astia on paineeton astia, jossa vesi on erotettu ilmasta paineettomalla muovikalvolla tai kumipussilla. (20.)

Paisuntasäiliö on yleensä sijoitettu lämmönjakohuoneeseen eli rakennuksen alaosaan. Korkeassa rakennuksessa järjestelmän staattinen paine eli paisunta-astian alapinnan ja lämmitysverkoston ylimmän pisteen korkeusero nostaa paisunta-astian esipaineen niin suureksi, että paisunta-astian kannattaakin sijoittaa verkoston ylimpään kohtaan, jossa esipaine on pienempi. (20.)

### 3.3 Lämpölaajeneminen ja putkiston kannatus

Putkiston kannatuksessa tulee ottaa huomioon korkeat putkinousut ja lämpötilanvaihteluiden aiheuttama putkien lämpölaajeneminen. Lämmitysverkostossa putkiston lämpötila voi vaihdella esimerkiksi välillä 20–60 °C. Tämä aiheuttaa putkistossa lämpölaajenemista, joka suurenee putkipituuden ja seinämän vahvuuden kasvaessa. Korkeissa rakennuksissa lämpölaajenemisen merkitys korostuu

pitkissä nousujohdoissa, joissa ei ole haaroja. Hallitsematon lämpölaajeneminen voi vahingoittaa putkistoa, liitoksia ja kannakkeita tai aiheuttaa ääniongelmia ja myös lyhentää putkiston käyttöikää. (23.)

Putkiston lämpölaajenemista pyritään tasaamaan ensisijaisesti niin kutsutulla luonnollisella kompensoinnilla esimerkiksi suunnanmuutoksilla, kuten mutkat ja haarat, ja joustavasti asennetuilla putkiosuuksilla. Lämmitys- ja käyttövesiputkistoissa pitkissä ja suorissa putkivedoissa voidaan käyttää paisuntakaaria tai paljetasaimia lämpöliikkeen tasoittamiseen. (23.) Viemäreiden osalta lämpölaajenemisen hallintaan riittää usein viemärin muhvinna oleva paisuntavara. Viemärissä voidaan käyttää myös erillistä paisuntayhdettä, jos muhvinna paisuntavara ei riitä. (24, s. 62.)

Putkiston pystynousut kannatetaan niin, että putken oma paino ja nesteen aiheuttamat voimat kohdistuvat kannatuspisteeseen eivätkä vaakaputken liitokseen. Pystynousuissa tulee olla vähintään yksi kannake jokaisessa kerroksessa välipohjan läpivientien lisäksi. Pitkissä pystynousuissa kannakkeiden tulee olla sekä kiinteitä että lämpöliikkeen sallivia. Lämpöliikkeen salliva kannatus tehdään liukukannakkeilla tai kierretankokannatuksena. Lämpölaajenemisen kompensoimiseksi keskelle nousua asennetaan kiintopiste, jolloin putkiston liike ohjautuu tasaisesti kiintopisteen ylä- ja alapuolelle. (25.) Korkeassa rakennuksessa kiintopiste asennetaan vyöhykkeen keskikohdalle (26).

## 4 KÄYTTÖVESI- JA VIEMÄRIJÄRJESTELMÄT

Rakennuksen vesi- ja viemärlaitteistojen suunnittelussa noudatetaan Ympäristöministeriön asetusta rakennusten vesi- ja viemärlaitteistosta 1047/2017. Käyttövesijärjestelmää suunniteltaessa korkeaan rakennukseen on erityisesti huomioitava verkoston painetaso. Korkeassa rakennuksessa haasteena on sopivan painetason saavuttaminen sekä rakennuksen ylä- että alaosaan. (27.)

Käyttövesiverkoston suunnittelussa tulee ottaa huomioon korkeudesta johtuva korkea hydrostaattinen paine. Avoimessa järjestelmässä tarvitaan paineen korotusta, jotta ylimpien kerrosten vesikalusteilta saadaan määräysten mukainen virtaama. Paineen korotuksen vuoksi alimmissa kerroksissa paine voi nousta liian suureksi, minkä vuoksi voidaan tarvita paineenalennusventtiilejä. (28.) Hydrostaattinen paine on nesteen tiheyden, putoamiskiihtyvyyden ja nestepatsaan korkeuden tulo. Se voidaan esittää kaavalla 1. (2, s. 4.15.)

$$p = \rho gh$$

KAAVA 1

missä,

$p$  = hydrostaattinen paine (Pa)

$\rho$  = nesteen tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

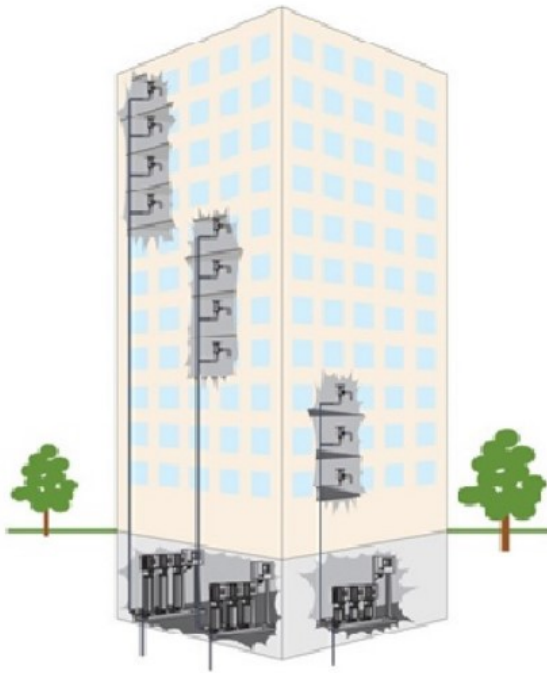
$g$  = putoamiskiihtyvyys (m/s<sup>2</sup>)

$h$  = nestepatsaan korkeus (m)

### 4.1 Vyöhykejako ja paineenkorotus

Korkeissa rakennuksissa käyttövesijärjestelmän suunnittelussa hyödynnetään vyöhykejakoja (kuva 5). Vyöhykejaon tavoitteena on hallitut ja tasaiset paineet kaikilla verkoston vesipisteillä. Rakennus jaetaan kerrosluvun mukaisesti sopivan kokosiin vyöhykkeisiin. Rakennuksen korkeus vaikuttaa vyöhykkeiden lukumää-

rään. Käyttövesijärjestelmä jaetaan usein vähintään kahteen vyöhykkeeseen, jolloin rakennuksen alaosaa palvelevalla vyöhykkeellä verkosto toimii kunnallisen vesijohtoverkoston paineella ja rakennuksen yläosaa palvelevalla vyöhykkeellä verkosto on varustettu paineenkorotuksella. Paineenkorotuksen toteuttamiselle on olemassa muutamia erilaisia vaihtoehtoja. (26.)



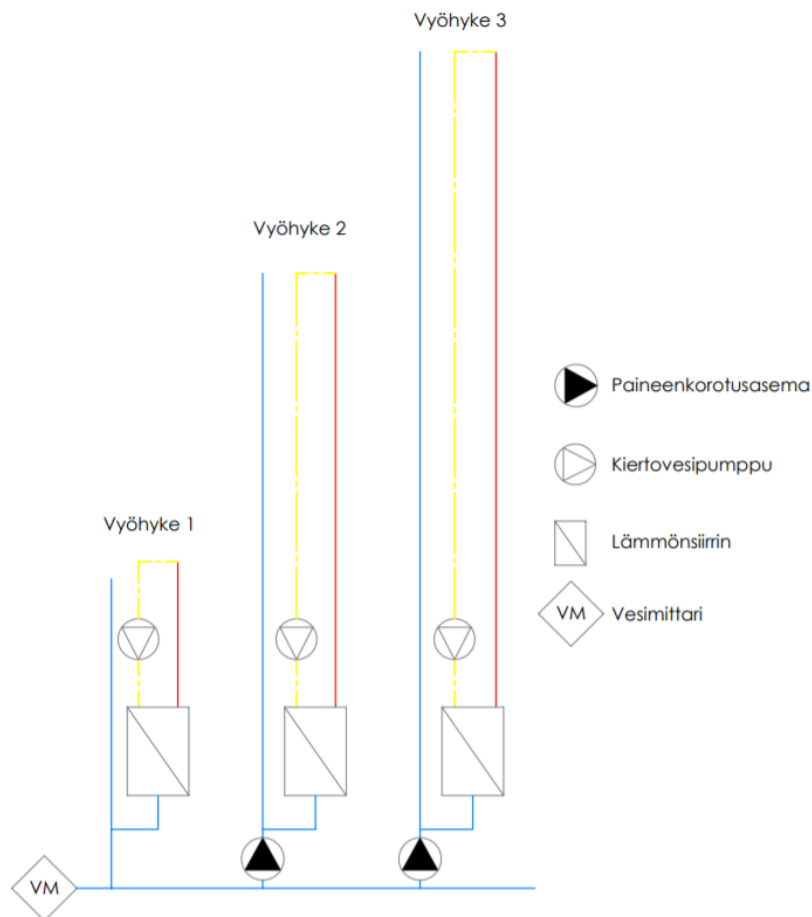
*KUVA 5. Käyttövesiverkoston vyöhykejako (29)*

Korkean rakennuksen käyttövesiverkosto jaetaan tyypillisesti korkeussuunnassa noin 6–8 kerroksen vyöhykkeisiin riippuen kerroskorkeudesta, jotta paine-ero vyöhykkeen ala- ja yläosan välillä ei kasvaisi liian suureksi. Erityisen korkeiden rakennusten kohdalla jopa 10 kerroksen vyöhykkeet ovat kuitenkin mahdollisia. Tällöin vyöhykkeen alaosissa käytetään paineenalennusventtiiliä, jotta paine jakojohdoissa ei ylitä 500 kPa:a. (27.)

Käyttövesijärjestelmän suunnittelun tavoitteena tulisi olla mahdollisimman vakaa ja alhainen painetaso. Suunnittelemalla verkostot väljiksi saadaan alennettua putkistojen painehäviöitä ja virtausnopeuksia. Samalla myös äänihaitat vähene-

vät. Virtaamatarkastelussa epäedullisimmille vesikalusteille täytyy saada vähintään 70 % normivirtaamasta, ja se tulee ottaa huomioon vyöhykejaon suunnittelussa. (30; 31.)

Vyöhykkeiden paineenkorotus voidaan toteuttaa lämmönjakohuoneessa, josta jokaiselle vyöhykkeelle on oma pystynousu kyseisen vyöhykkeen ylimpään kerrokseen asti (kuva 6). Jokaisen vyöhykkeen lämpimän käyttöveden lämmönsiirtimet sijoitetaan myös lämmönjakohuoneeseen. Jokaisella vyöhykkeellä on myös oma lämpimän käyttöveden kiertojohto ja kiertovesipumppu. Paineenkorotusasema asennetaan kylmän käyttöveden linjaan ennen lämmönsiirintä, jolloin vyöhykkeen kylmä- ja lämminvesiverkoston paineenkorotus toteutetaan yhdellä paineenkorotusasemalla. Rakennuksen alaosaan palvelevan vyöhykkeen verkosto toimii kunnallisen vesijohtoverkoston paineella. (32; 33.)

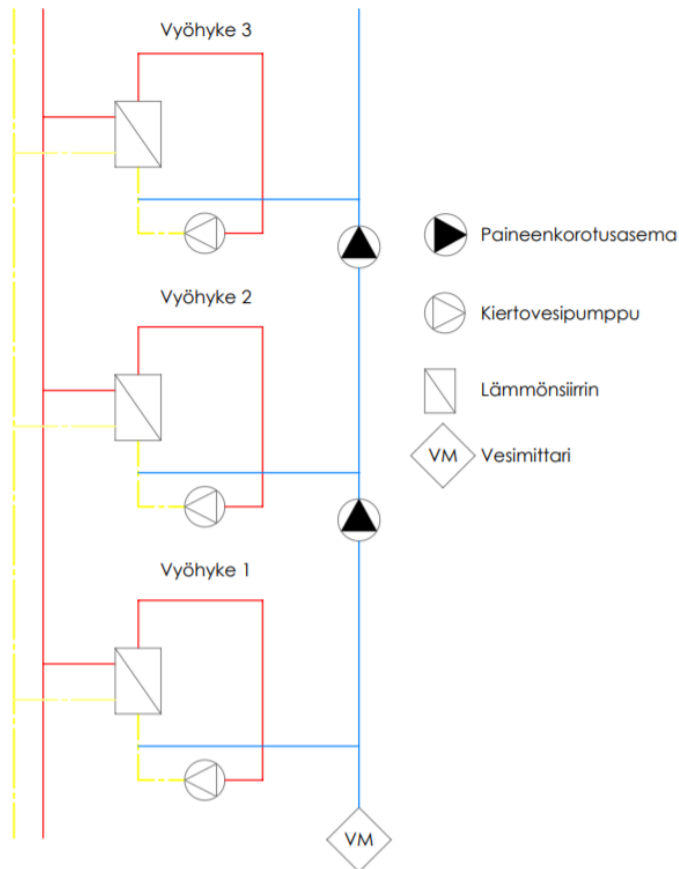


KUVA 6. Pystynousuin toteutettu käyttövesijärjestelmä

Rakennuksen ylempiä osia palvelevien vyöhykkeiden paineenkorotus voidaan myös yhdistää toteutettavaksi yhdellä paineenkorotusasemalla. Tällöin kylmän käyttöveden linjan paine korotetaan ylemmän vyöhykkeen tarvitsemaan paineeseen ennen lämmönsiirtimiä ja alemman vyöhykkeen verkoston painetta säädetään paineenalennusventtiilillä siten, että paine jakojohdoissa on alle 500 kPa. Tässäkin toteutustavassa jokaisella vyöhykkeellä on oma lämpimän käyttöveden lämmönsiirrin, kiertovesijohto ja -pumppu. (32.)

Vyöhykkeiden paineenkorotuksessa tulee huomioida käyttövesiverkoston laitteiden ja osien paineen kesto. Paineenkorotusasema asennetaan ensisijaisesti kylmän veden nousulinjaan, jossa sen käyttöikä on pidempi kuin lämpimän veden nousulinjassa. (26.) Asetuksen 1047/2017 mukaan vesilaitteiston tulee kestää sisäistä ylipainetta vähintään 1 000 kPa. Kaukolämpömääräyksissä K1/2013 toisiopuolen suurin sallittu käyttöpaine on 1 000 kPa. Jos tarvittava paineenkorotus käyttövesijärjestelmässä on yli 1 000 kPa, paineenkorotus voidaan toteuttaa lämpimän käyttöveden verkostolle vasta lämmönsiirtimen jälkeen. (27; 21.)

Korkean rakennuksen käyttövesijärjestelmä voidaan toteuttaa myös yhdellä kylmän veden nousulinjalla (kuva 7). Vyöhykkeiden tarvitsema paineenkorotus toteutetaan tällöin lämmönjakohuoneen sijasta tekniikkakerroksissa. Paineenkorotusasemat vievät kerrostilaa, mutta painetaso saadaan pidettyä alhaisempana, kun paine korotetaan ylemmissä kerroksissa. Alempi painetaso vähentää liitos- ja laitevaurioriskiä. Paineenkorotusasemien sijoittamisessa tulee ottaa huomioon niiden aiheuttamat äänihaitat. Yhden kylmän veden nousulinjan ratkaisussa käyttöveden lämmitysverkoston nousulinja täytyy toteuttaa korkeapaineisena. Silloin ei tarvita useita nousulinjoja. Jokainen vyöhyke kuitenkin vaatii oman lämmönsiirtimensä, tai alemmien kerrosten paine nousee liian suureksi. (33.)



KUVA 7. Yhdellä kylmän veden nousulinjalla toteutettu käyttövesijärjestelmä

## 4.2 Viemärijärjestelmät

Korkean rakennuksen viemäroinnissä päämääränä on turvallinen jäteveden poistuminen rakennuksesta. Viemäroinnin toimivuuden kannalta on tärkeää viemäriin riittävä tuuletus ja viemärikaasujen siirtymisen estäminen rakennukseen vesilukoilla. Korkeassa rakennuksessa viemäriin paineiden hallinta voi olla suurempi haaste kuin tavallisessa rakennuksessa. (34.)

Viemäriissä vallitseva ylipaine voi aiheuttaa ilman pääsemisen vesilukon läpi työntäen tilaan viemärikaasuja. Vastaavasti alipaine voi imeä veden pois vesilukosta. Sen seurauksena voi syntyä suora yhteys viemäriin ja huoneilman välille, ja huoneilmaan voi päästä taudinaiheuttajia. Vesilukon pettämisen estämiseksi tärkein osa korkean rakennuksen viemärointiä on tuuletusviemäri. Suljetussa ym-

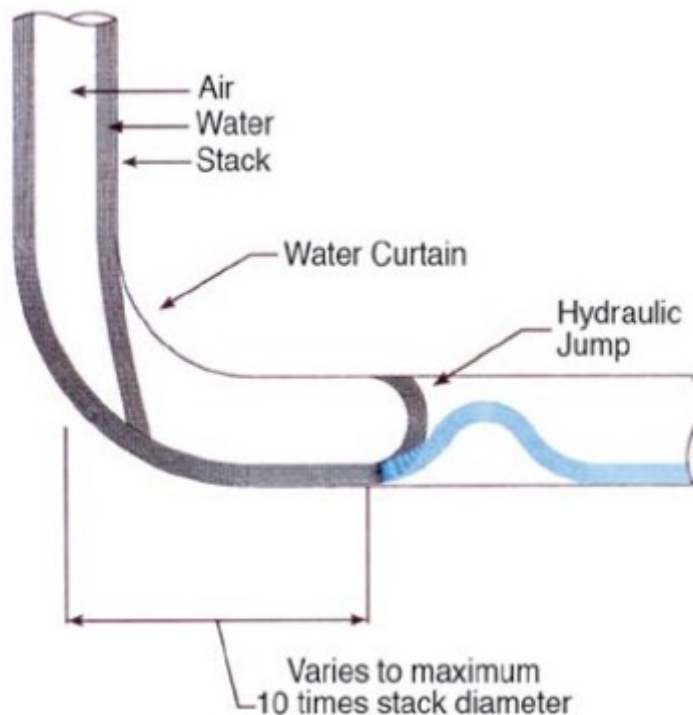
päristössä pystyputkessa virtaava litra jätevettä tarvitsee noin 32 litraa ilmaa virtausta varten. Jos virtaus ei saa korvausilmaa, sen taakse muodostuu alipaine ja korvausilma voi tulla vesilukkojen kautta. (34.)

Virtausnopeuden hallinta ei ole tärkeä elementti korkean rakennuksen viemärisuunnittelussa. Jäteveden siirtyessä vaakaviemäristä pystykokoojaputkeen gravitaatiovoima kiihdyttää virtausta 9,81 m/s<sup>2</sup> ja virtaus tarttuu kokoojaputken seinämiin nopeasti. Putken keskelle jää ilmareikä. Virtauksen kiihtyminen jatkuu, kunnes virtausta vastustava putken seinämän kitkavoima on yhtä suuri kuin kiihdyttävä gravitaatiovoima. Virtausnopeus on silloin saavuttanut terminaalinopeutensa. Eri kokoisissa kokoojaputkissa virtauksen terminaalinopeus on 3 m/s – 5 m/s. Nopeus saavutetaan yleensä kolmesta viiteen metriä putoamisen alkamisesta. Siten virtausnopeus pystykokoojaputken alaosassa ei merkittävästi eroa 100-kerroksisen ja 3-kerroksisen rakennuksen välillä. (35, s. 88–89.)

Korkean rakennuksen viemäroinnissä ongelmaksi voi muodostua vaahtoutuminen. Jos rakennuksen yläosassa käytetään vaahtoutumista aiheuttavia pesuaineita, aineet sekoittuvat tehokkaasti veteen ja ilmaan kokoojaputkessa. Vaahtot valuvat viemäroinnin alaosiin. Koska jätevesi on vaahtoa raskaampaa, valuu se vaahton täyttämän viemärin läpi siirtämättä vaahtoa mukanaan. Vaahto sulkee sisäänsä ilmaa, minkä seurauksena veden lisäksi ilma virtaa putkistoissa. Jäteveden virtauksesta aiheutuvat paineiden muutokset puristavat vaahtoa kasaan, jolloin vaahto voi tulvia viemäristä rakennukseen. Mikäli vaahto ei löydä pakotietä viemäristä, paine kasvaa ja vesilukot voivat pettää. Vaahtoutumista esiintyy viemäreissä kohdissa, joissa putken kulkusuunta muuttuu pysty- ja vaakasuunnan suhteen yli 45 astetta. (35, s. 92–95.)

Virtauksen siirtyessä pystykokoojaputkesta vaakaputkeen voi syntyä hydraulinen hyppy (kuva 8). Se syntyy vaakaputkessa äkillisen nopeuden muutoksen seurauksena virtaussuunnan muuttuessa. Virtaavan veden syvyyden muutos voi täyttää koko putken alan. Etäisyyteen, jonka päässä hyppy tapahtuu pohjakulmasta, vaikuttavat virtausnopeus, jäteveden massa, putken pinnan karheus sekä putken halkaisija ja kulma. Hyppy on pienempi, jos vaakaputki on pystyputkea halkaisijaltaan suurempi. Tulokulmaa suurentamalla saadaan myös pienennettyä

hyppyä. Tyypillisesti hydraulisen hypyn jälkeen putki virtaa täytenä ja virtauksen mukana siirtyy ilmaa suurina kuplina. Virtaus jatkuu täyttäen koko putken pinta-alan, kunnes seinämien kitka hidastaa virtausta riittävästi. Vaakaputkeen hypyn jälkeiselle alueelle syntyy suuri ylipaine, mikäli viemäri ei saa riittävää tuuletusta. Vesikalusteiden viemäriiliitoksia ei saa liittää vaakaputkeen liian lähelle pohjakulmaa. (35, s. 90–91.)



*KUVA 8. Hydraulinen hyppy (36)*

Viemäroinnin paineen vaihtelun vähentämiseksi tulee siihen liittää tuuletusviemäri. Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan viemäri mitoitetaan riittävän väljäksi viemäriputken täyttösuhdetta mitoitusperusteena käyttäen. Huoneisto- tai kerroskohtaisia tuuletusputkia ei tarvita, kun käytetään väljää mitoitus tapaa ja katolle vievää tuuletusputkea. Vaihtoehtoisesti korkeassa rakennuksessa pystyviemäriin tuuletus voidaan toteuttaa esimerkiksi 10 kerroksen välein. (35, s. 96; 31.)

## 5 ILMANVAIHTOJÄRJESTELMÄT

Rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmällä hallitaan sisäilman fysikaalisia ominaisuuksia, kuten lämpötila, kosteus ja epäpuhtauksien pitoisuudet. Ilmanvaihto mitoitetaan ja suunnitellaan sisäilman arvoille asetettuihin vaatimuksiin perustuen. Suomen rakentamismääräyskokoelmasta Ympäristöministeriön asetus 1009/2017 antaa minimivaatimukset rakennusten ilmanvaihdolle. Rakennusta suunniteltaessa sisäilmastolle voidaan asettaa myös korkeampia vaatimuksia, esimerkiksi sisäilmastoluokituksen asettamia arvoja. (37.)

Asetuksen 1009/2017 mukaan hormivaikutuksen hallinta on suunniteltava siten, että edellytykset ilmanvaihdon toiminnalle täyttyvät eikä epäpuhtauksia ja radonia siirry sisäilmaan ja kosteutta ei siirry rakenteisiin (37). Ilmavuodot vaikuttavat rakennuksissa merkittävästi kosteuden siirtymiseen rakenteisiin, lämmityksen tehontarpeen lisääntymiseen, meluhaittoihin ja asumismukavuuteen. Hormivaikutuksen aiheuttamien paine-erojen seurauksena rakennuksen tiiveyden tarve korostuu korkeissa rakennuksissa. Hormivaikutus on erityisesti ongelmallinen korkeissa rakennuksissa, joissa epätasapainossa oleva koneellinen ilmanvaihto ei pysty hallitsemaan riittävästi painesuhteiden muutoksia. (38.)

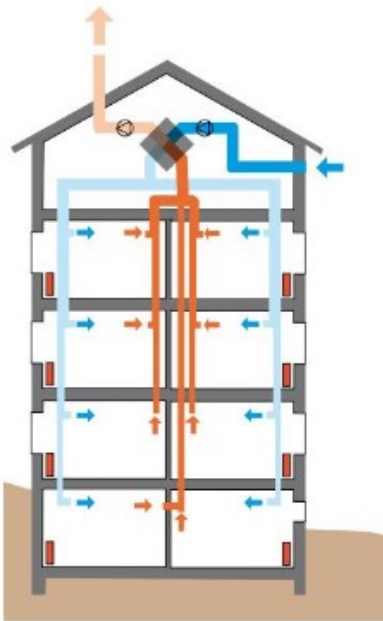
Korkeissa rakennuksissa on tarve suuremmalle määrälle ilmanvaihdon laitteita kuin matalassa ja pienemmässä rakennuksessa. Ilman siirtäminen suurien korkeuserojen välillä vaatii huolellisesti suunniteltuja kanavistoja, puhaltimia ja ilmavirtojen ohjausta, joilla saadaan aikaiseksi tasapainoinen ja toimiva järjestelmä. Järjestelmän tasapainoa häiritsee vuoden ajan mukaan muuttuva hormivaikutuksen voimakkuus. (38.)

Mahdollisia korkean rakennuksen ilmanvaihdon toteutustapoja ovat asuntokohtaiset, kerroskohtaiset ja keskitetyt ilmanvaihtoratkaisut. Ilmanvaihdon suunnittelussa tulisi pyrkiä yksinkertaisiin ratkaisuihin, jolloin vähennetään palopeltien ja savuindikointijärjestelmien tarvetta. Hormivaikutus on huomioitava koko ilmanvaihdon suunnitteluprosessin ajan. Mahdolliset tilojen ylipaineet täytyy estää riittävien painemittauksin. (26.)

Ilmanvaihdon suunnittelussa huomioitavia asioita ovat porraskäytävä ja sen painesuhteet huoneistoihin nähden. Ilmavirtaus suuntautuu porraskäytävästä huoneistoihin ja vastaavasti huoneistoista porraskäytävään. Jos huoneistojen ja porraskäytävän erottavat ovet ovat tarpeeksi tiiviitä, vuotoilmareittiä porraskäytävään ei ole. Porraskäytävän ilmavirtojen säädöllä sekä ulko- ja sisäilman lämpötilaeroilla on myös vaikutus ilmavirtauksiin. (39, s. 120.)

### 5.1 Toteutusvaihtoehdot

Keskitettyssä ilmanvaihtojärjestelmässä ilmanvaihtokonehuone sijoitetaan palvelumiensa tilojen yläpuolelle (kuva 9). Mitä useampia kerroksia yksittäisen keskitetyn ilmanvaihtokoneen palvelualue käsittää, sitä suuremmaksi runkokanavien koko kasvaa. Suurempien kanavien vuoksi tarvitaan myös suurempia hormeja. Keskitetyn järjestelmän ilmanvaihtokonehuoneen tarvitsema pinta-ala on suurempi verrattuna vaihtoehtoisiin järjestelmiin. Etuna keskitetyssä järjestelmässä on sen helppo huollettavuus, ja siihen on helppo sisällyttää tuloilman viilennys. (26.)



KUVA 9. Keskitetty ilmanvaihtojärjestelmä (40, s. 93)

Keskitetty ilmanvaihtojärjestelmä voidaan toteuttaa keskitetysti yhteisellä säädöllä tai huoneistokohtaisella säädöllä. Jos huoneistot on liitetty keskitettyyn ilmanvaihtojärjestelmään ilman huoneistokohtaista ilmavirransäätöä, ilmavirtojen ohjaus on yhteinen. Tällöin ilmavirrat eivät käytännössä ole tarpeenmukaisia, koska tehostettujen ilmavirtojen tarve varsinkin asuinkerrostalossa huoneistojen kesken on ajallisesti erilainen. Yhteisellä säädöllä toteutetussa ilmanvaihtojärjestelmässä käytetään yhteiskanavia. (39, s. 120, 123.)

Keskitettyyn ilmanvaihtojärjestelmään voidaan toteuttaa huoneistokohtainen säätö kanaviston ilmavirtasäätimillä. Huoneistoissa ilmavirtasäätimiä ohjataan yleensä liesikuvulta. Puhaltimien ilmavirtaa ohjataan kanavapaineen mittauksen perusteella. Tulo- ja poistoilmakanavat voidaan johtaa ilmanvaihtokonehuoneeseen joko huoneistokohtaisina erilliskanavina, jolloin nousukanava toimii myös palonrajoittimena, tai huoneistojen kanavat yhdistetään yhteiseksi nousukanaviksi. Tällöin yhteiset kanavaosuudet on mitoittettava virtausteknisesti riittävän väljiksi. (39, s. 123.)

Kerroskohtainen ilmanvaihtojärjestelmä on ikään kuin pienemmälle kokonaisuudelle jaettu keskitetty ilmanvaihtojärjestelmä. Kerroskohtainen ilmanvaihtojärjestelmä voi palvella esimerkiksi yhden tai kahden kerroksen tiloja. Järjestelmä on toteutettavissa myös huoneistokohtaisella säädöllä. Kerroskohtaisessa järjestelmässä pystysuuntaisilla ilmanvaihtokanavilla on vähemmän korkeutta, jolloin painesuhteiden hallinta on helpompaa kuin keskitetyssä järjestelmässä. Etuna kerroskohtaisessa järjestelmässä on myös pienempi konekoko, jolloin konehuoneiden pinta-alan tarve on pienempi. (41, s. 9; 26.)

Huoneistokohtaisessa eli hajautetussa ilmanvaihtojärjestelmässä jokaista huoneistoa palvelee oma ilmanvaihtokone (kuva 10). Ulkoilma otetaan huoneiston ulkoseinältä. Raitisilmakanavan sijoittamisessa tulee ottaa huomioon ikkunat, parvekkeet, ulospuhallusilman sijoitus, katualueet, sisäpihat ja palomääräykset. Poistoilma voidaan johtaa huoneistokohtaisilla erilliskanavilla vesikatolle tai käyttää yhteiskanavaa. Poistoilma voidaan myös puhaltaa ulos huoneiston ulkoseinästä. Seinäpuhallusta käyttäen vältetään pitkät poistoilman pystykanavat, mutta

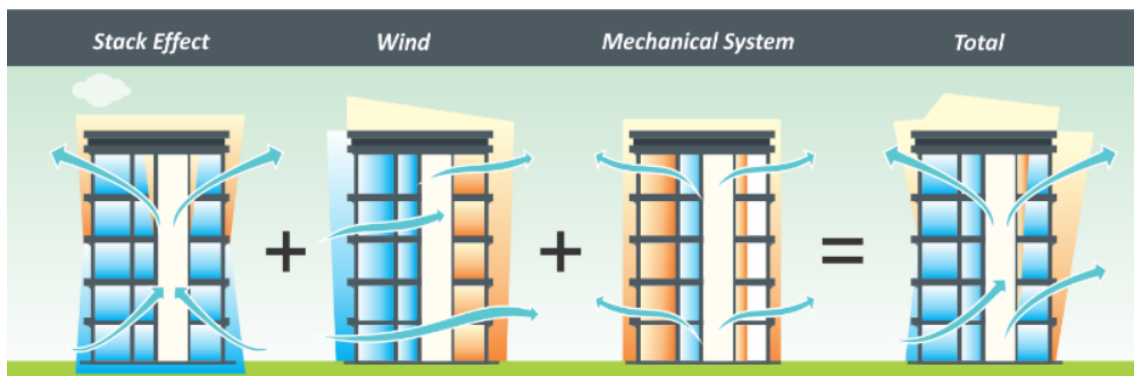
sen periaatteista tulee aina neuvotella paikallisen rakennusvalvonnan kanssa. (39, s. 125; 40, s. 95.)



KUVA 10. Huoneistokohtainen ilmanvaihtojärjestelmä (42, s. 4)

## 5.2 Painesuhteiden hallinta

Rakennuksen sisä- ja ulkoilman väliset painesuhteet ja rakennuksen ilmatiiviyys vaikuttavat ilmavirtauksiin rakennuksissa. Paine-erot pyrkivät tasoittumaan, jolloin ilma virtaa korkeammasta paineesta matalamman paineen suuntaan. Rakennuksen painesuhteisiin vaikuttaa kolme tekijää, jotka ovat ilmanvaihto, ilman lämpötilaerot ja tuuli (kuva 11). (43.)



KUVA 11. Painesuhteiden yhteisvaikutus muodostuu hormivaikutuksesta, tuulesta ja koneellisesta ilmanvaihdosta (44).

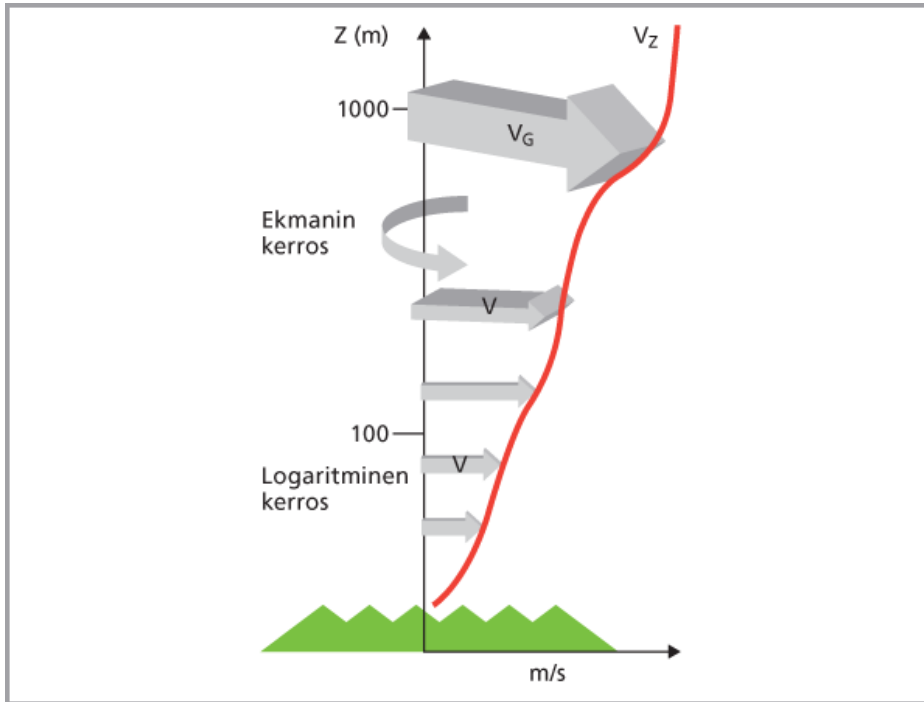
Sisä- ja ulkoilman lämpötilaerot vaikuttavat rakennuksen painesuhteisiin sitä voimakkaammin mitä suurempi ero on. Erityisesti lämmityskaudella rakennuksen alaosaan muodostuu alipaine ja yläosaan ylipaine. Lämpötilaerojen aiheuttamaa vaikutusta kutsutaan hormivaikutukseksi. Tuulen vaikutus rakennuksen painesuhteisiin on tuulen luonteesta johtuen satunnaista. Tuuli vaikuttaa rakennuksen sisä- ja ulkoilman välisiin painesuhteisiin. Ilmanvaihdon vaikutus painesuhteisiin riippuu ilmanvaihtojärjestelmästä sekä järjestelmän säädöistä ja kunnosta. (43.)

### 5.3 Tuuli

Suomen ilmastolle on tyypillistä, että talvikuukausina tuulee enemmän kuin kesäkuukausina. Tuulioloihin vaikuttaa merkittävästi maantieteellinen sijainti ja pääasiassa Atlantilta suuntautuvat matalapaineet. Suomessa vallitseva tuulen suunta on lounas ja keskimääräinen tuulen nopeus noin kilometrin korkeudessa on 9–9,5 m/s. (45.)

Tuulen nopeus kasvaa korkeussuunnassa. Maaston korkeuserot, rosoisuus ja ilman terminen tasapainotila vaikuttavat nopeuden kasvuun. Pinnan rosoisuudella tarkoitetaan vaihtelevia maaston muotoja, pinnan laatua ja peitteisyyttä. Rosoisuus synnyttää kitkaa, jonka vaikutuksesta vapaan ilmakehän tuulen nopeus hidastuu maanpintaa lähestyttäessä. Tästä johtuen tuulen nopeuden muutos korkeussuunnassa on suurempaa esimerkiksi metsä- ja kaupunkialueilla kuin avoimilla alueilla. Ilman terminen tasapainotila puolestaan vaikuttaa tuulen nopeuden pystysuoran muutoksen suuruuteen eli poikkeamaan logaritmisesta tuuliprofiilista. (45.)

Kerrosta, jossa maaston epätasaisuus ja terminen tasapainotila vaikuttavat, kutsutaan rajakerrokseksi (kuva 12). Rajakerroksen korkeus vaihtelee maantieteellisesti ja paikallisesti säätilan ja termisen tasapainotilan mukaan. Suomessa rajakerroksen korkeus on tyypillisesti 100–1000 metriä. Rajakerroksessa virtaus on lähes aina turbulენტista. Rajakerroksen alaosassa neutraalissa säätilanteessa tuulen nopeuden muutos on lähes logaritminen tuulen suunnan pysyessä samana. Rajakerroksen yläosassa tuulen nopeuden suunta muuttuu. (45.)



KUVA 12. Korkeuden vaikutus tuulen nopeuteen (45)

Tuulen nopeuden profiiliin liittyvä ilmiö on myös noin 100–600 metrin korkeudella ilmenevä alailmakehän suihkuvirtaus, jonka korkeusalueella tuulen nopeus on suurempi sekä alempaan että ylempään ilmakerrokseen nähden. Nopeuden kerrostuminen johtuu viereisten ilmakerrosten lämpötilaeroista. Kyseinen ilmiö on Suomessa melko yleinen ja sen vaikutus tuulen nopeuteen tulisi huomioida korkeita rakennuksia suunniteltaessa. (45.)

Tuulen aiheuttama paine rakennukseen riippuu tuulen nopeudesta, suunnasta ja rakennuksen geometriasta. Pinnalle, johon tuuli kohdistuu, muodostuu ylipaine ja suojan puoleiselle pinnalle sekä sivupinnoille muodostuu alipaine. Harjakatolla suojan puoleisella lappeella ja tasakatolla vallitsee alipaine. (43.)

Rakennuksen sisäpuoliseen paineeseen vaikuttavat vallitseva tuulen suunta ja rakennuksen aukkojen sijainti. Jos rakennuksen tuulenpuoleinen seinä on muita seiniä epätiivimpi, rakennuksen sisäpuolelle muodostuu ylipaine. Vastaavasti rakennuksen sisälle muodostuu alipaine, jos suurin osa aukoista on suojan puoleisella seinällä. (43.)

Tuulen aiheuttamaa painetta voidaan yleisellä tasolla arvioida Bernoullin yhtälöllä (kaava 2). Yhtälö pätee tapauksessa, jossa tasainen ilmavirtaus kohdistuu kohtisuoraan rakennuksen pintaa vastaan, ja pintaan ei kohdistu muita virtauksia. (46, s. 24.4.)

$$p_s = C_p \frac{1}{2} \rho v^2$$

KAAVA 2

missä,

$p_s$  on yli- tai alipaine rakennuksen ulkovaipalla (Pa)

$C_p$  on rakennuksen geometriasta ja tuulen suunnasta riippuva vakio, painekerroin [-]

$\rho$  on ulkoilman tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$v$  on tuulen nopeus (m/s)

Tuulen nopeus halutulla korkeudella voidaan laskea kaavalla 3 (46, s. 24.4).

$$U_h = U_{met} \left( \frac{\delta_{met}}{H_{met}} \right)^{a_{met}} \left( \frac{H}{\delta} \right)^a$$

KAAVA 3

missä,

$U_h$  on tuulen nopeus halutulla korkeudella (m/s)

$U_{met}$  on mitattu nopeus (m/s)

$\delta_{met}$  on ilmakehän rajakerroksen paksuus (m)

$H_{met}$  on mittausaseman korkeus (m)

$a_{met}$  on kerroin (-)

$H$  on korkeus maanpinnasta (m)

$\delta$  on ilmakehän rajakerroksen paksuus (m)

$a$  on kerroin (-)

## 5.4 Hormivaikutus

Kylmässä ilmastossa korkea rakennus käyttäytyy savupiipun tapaisesti. Suuren ulko- ja sisäilman lämpötilojen eron sekä rakenteiden vuotokohtien seurauksena ilma virtaa luonnollisella konvektiolla vuotokohtien kautta rakennuksen alempiin kerroksiin ja ylöspäin rakennuksen läpi kuiluja ja hormoneja pitkin poistuen rakennuksen yläosasta. Ilman lämpötilaerojen aiheuttama vaikutus syntyy, kun ilman lämmitessä sen tiheys pienenee ja kylmää ilmaa kevyempi lämmin ilma pyrkii kohoamaan ylöspäin. Hormivaikutuksen voimakkuus on suoraan verrannollinen rakennuksen korkeuteen ja lämpötilaeron suuruuteen. (2, s. 4.1.)

Hormivaikutus on käänteinen, kun ulkoilman lämpötila on sisäilman lämpötilaa korkeampi. Lämpimässä ilmastossa ilma virtaa sisään rakennukseen sen yläosasta ja poistuu rakennuksen alaosasta. (2, s. 4.1.) Suomessa kesäaikaan sisä- ja ulkoilman lämpötilaerot eivät kuitenkaan ole niin suuria kuin talvella, joten merkittävää käänteistä hormivaikutusta ei muodostu (47, s. 5).

Hormivaikutuksen seurauksena rakennuksen alaosiin muodostuu ulkoilmaan nähden alipaine ja ylimpiin kerroksiin ylipaine. Alipaine aiheuttaa ilman virtauksen rakennukseen vuotoilma-aukkojen kautta. Rakennuksen yläosassa ylipaineen vaikutuksesta lämmin sisäilma vuotaa ulos rakennuksen ulkovaipan vuotokohdista. Ilmavirrat sisään ja ulos rakennuksesta ovat aina yhtä suuret. (47, s. 5–7.)

Rakennukseen muodostuu hormivaikutuksen vallitessa kohta, jossa ulko- ja sisäilman paineet ovat yhtä suuret. Tätä kutsutaan neutraaliksi painetasoksi. Neutraalin painetaso sijaintiin vaikuttavat ulkovaipan tiiviys, rakennuksen osastointi ja sisärakenteiden tiiviys sekä hormien ja kuilujen rakenne ja tiiviys. (2, s. 4.1.) Jos rakennuksen ylä- ja alaosissa olevat vuotoaukot ovat yhtä suuret, sijoittuu neutraali painetaso puoliväliin rakennusta. Neutraali painetaso siirtyy ylemmäs, jos yläosan vuotoaukot ovat suurempia kuin rakennuksen alaosissa, ja vastaavasti neutraali painetaso siirtyy alemmas vuotoaukkojen ollessa suuremmat rakennuksen alaosissa. (47, s. 6.)

Sisä- ja ulkoilman lämpötilaeroista johtuva paine-ero tietyllä korkeudella voidaan laskea, kun neutraalin painetaso korkeusasema tiedetään. Teoreettinen paine-

ero vaipan yli vakio­lämpötilassa korkeuserolla  $\Delta h$  neutraalista painetasosta voidaan laskea kaavalla 4. (46, s. 16.7.)

$$\Delta p = (\rho_s - \rho_u)g\Delta h$$

KAAVA 4

missä,

$\Delta p$  on paine-ero vaipan yli (Pa)

$\rho_s$  on sisäilman tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_u$  on ulkoilman tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$g$  on putoamiskiihtyvyys (9,81 m/s<sup>2</sup>)

$\Delta h$  on korkeusero neutraalista painetasosta (m)

Kostean ilman tiheys lasketaan kaavalla 5 (48, s. 1).

$$\rho = \frac{M_i p_i}{R_u T} + \frac{M_h p_h}{R_u T}$$

KAAVA 5

missä,

$\rho$  on kostean ilman tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$M_i$  on kuivan ilman moolimassa (kg/kmol)

$p_i$  on kuivan ilman osapaine (Pa)

$R_u$  on yleinen kaasuvakio (J/kmolK)

$T$  on absoluuttinen lämpötila (K)

$M_h$  on vesihöyryn moolimassa (kg/kmol)

$p_h$  on vesihöyryn osapaine (Pa)

Kuivan ilman osapaine lasketaan vähentämällä siitä vesihöyryn osapaine (kaava 6) (48, s. 1).

$$p_i = p_0 - p_h$$

KAAVA 6

missä,

$p_0$  on ilmanpaine (Pa)

$p_h$  on vesihöyryn osapaine (Pa)

Kun tiedetään ilman suhteellinen kosteus, voidaan laskea vesihöyryn osapaine kaavalla 7 (48, s. 1).

$$p_h = \frac{\varphi}{100} p_{hs}$$

KAAVA 7

missä,

$\varphi$  on suhteellinen ilmankosteus (%)

$p_{hs}$  on vesihöyryn kyllästyspaine (Pa)

Lämpötilan perusteella saadaan laskettua vesihöyryn kyllästyspaine kaavalla 8 (48, s. 1).

$$p_{hs} = p_0 * e^{11,78 \frac{(T-372,79)}{(T-43,15)}}$$

KAAVA 8

missä,

$p_0$  on ilmanpaine (Pa)

$e$  on Neperin luku (-)

$T$  on ilmanlämpötila (K)

Neutraalin painetason sijaintia voidaan määrittellä kaavalla 9. Neutraalin painetason korkeusasema riippuu vuotoaukkojen pinta-alajakaumasta rakennuksessa. Sisään- ja ulosvirtaavien vuotoilmavirtojen lämpötilaeroista johtuvat tiheyserot voidaan jättää huomioimatta. (49.)

$$h_{NPL} = \frac{z}{1 + \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 \frac{T_s}{T_u}}$$

KAAVA 9

missä,

$h_{NPL}$  on neutraalin painetason korkeusasema (m)

$z$  on rakennuksen korkeus (m)

$A_1$  on vuotoaukkojen pinta-ala rakennuksen yläosassa (m<sup>2</sup>)

$A_2$  on vuotoaukkojen pinta-ala rakennuksen alaosassa (m<sup>2</sup>)

$T_s$  on sisäilman lämpötila (K)

$T_u$  on ulkoilman lämpötila (K)

Neutraalin painetason sijaintia on käytännössä vaikea määrittää, koska rakennuksen epätiiviyiskohtien korkeusasema ja niiden virtausvastukset voivat vaihdella satunnaisesti (43). Neutraalin painetason sijaintia voidaan tarkemmin määrittää painemittauksilla ja simulointiohjelmilla. Tarkkaa määrittämistä varten myös rakennuksen vuotoaukkojen ilmanpitävyydet ja sijainnit tulisi pystyä mallintamaan. (47, s. 50.)

Hormivaikutus ja hallitsemattomat ilmavirtaukset aiheuttavat rakennuksessa veto- ja meluhaittoja rakennuksen alaosiin sekä rakennuksen yläosiin lämpöongelmia ja ulkovaipan kosteusvaurioita. Suuret paine-erot eri tilojen välillä vaikeuttavat ovien ja hissien ovien avautumista ja sulkeutumista. Hormivaikutus myös häiritsee ilmanvaihtojärjestelmän toimintaa ja aiheuttaa epäpuhtauksien siirtymistä sisäilmaan. (47, s. 1; 2, s. 4.2.)

Hormivaikutusta voidaan pienentää sekä rakenteellisilla että taloteknisillä ratkaisuilla. Suunnittelussa tulisi kiinnittää huomiota rakennuksen ulkovaipan ja sisärakenteiden ilmanpitävyyteen. Ilman siirtymistä kuiluihin voidaan vähentää osastomalla porrashuoneet ja hissikuilut sekä suunnittelemalla kulku porrashuoneeseen ja hisseihin sulkutilan tai eteisen kautta. Rakennuksen ulko-oven yhteyteen voidaan lisätä tuulikaappi automaattisilla ovilla tai pyöröovi, jolloin kylmän ulkoilman siirtyminen rakennukseen vähenee. Korkeassa rakennuksessa ilmanvaihto tulee suunnitella 5 % ylipaineiseksi, jolloin rakennuksessa on vähemmän alipaineisia osia. Ylipaine vähentää ulkoa virtaavan vuotoilman määrää, ja siten rakennus on energiatehokkaampi. Ilmanvaihdon suunnittelussa tulisi välttää pitkiä pystysuuntaisia ilmanvaihtokanavia, koska niihin vaikuttaa hormivaikutus. Ilmanvaihdon suunnittelussa tulisi suosia kerroskohtaisia ilmanvaihtokoneita. (47, s. 30, 39.)

## 6 PALOTURVALLISUUS

Rakennusten paloturvallisuus perustuu Suomen rakentamismääräyskokoelman listaamiin olennaisiin vaatimuksiin, jotka ovat kantavien rakenteiden kestäminen asetetun vähimmäisajan, palon ja savukaasujen kehittymisen sekä leviämisen rajoittaminen ja rakennuksessa olevien henkilöiden poistumisen turvaaminen. Pelastushenkilöstön turvallisuus on myös otettava huomioon, ja palon leviämistä läheisiin rakennuksiin tulee rajoittaa. (8.)

Rakennuksen korkeuden ja kerroslukujen lisääntyminen aiheuttaa haasteita paloturvallisuudelle. Pelastuslaitoksen toiminta vaikeutuu rakennuksen kerroslukujen lisääntyessä, ja tulipalon sattuessa vaaraan joutuvien ihmisten lukumäärä kasvaa. Pystysuorat poistumistiet ja tekniikan nousukuilut voivat edesauttaa savukaasujen ja lämmön leviämistä yläpuolisiin tiloihin. Rakennuksen korkeus myös kasvattaa poistumisteiden pituutta, minkä seurauksena evakuointiaika pitenee. Lähtökohtaisesti rakennus tulisi suunnitella siten, että rakennuksen kaikki käyttäjät voidaan evakuoida, mutta käytännössä täysimittainen evakuointi on haastavaa ja jopa mahdotonta korkeissa rakennuksissa. (50.)

### 6.1 Paloluokat

Rakennukset luokitellaan paloluokkiin P0, P1, P2 ja P3. P0-paloluokkaa käytetään, kun rakennuksen suunnittelu perustuu oletettuun palonkehitykseen. Paloluokan P1 rakennuksen palo-osastojen palokuormaryhmät tulee määrittää rakennuksen käyttötarkoituksen perusteella tai laskelmalla. P2- ja P3-paloluokan rakennuksen kokoa ja henkilömäärää rajoitetaan rakennuksen käyttötarkoituksen mukaan. (51.)

P1-paloluokan rakennuksen kokoa ja henkilömäärää ei ole rajoitettu, joten rakennukset, jotka eivät ole sallittuja P2- ja P3-paloluokkiin, luokitellaan P1-paloluokkaan. Korkeat rakennukset kuuluvat siis aina paloluokkaan P1. Asetus sallii yli 8-kerroksisten puukerrostalojen rakentamisen P0-paloluokan mukaan. P1-paloluokassa rakennuksen kantavien rakenteiden oletetaan kestävän paloa ilman sammuttamista, joten puukerrostaloa ei voida suunnitella P1-paloluokan mukaan.

(52, s. 8) P2- ja P3-paloluokkien rakenteiden vaatimukset voivat olla P1-paloluokkaa lievemmiä. P2-paloluokan rakennuksen korkeudeksi on rajattu 28 metriä. P3-paloluokan rakennuksen korkeus saa olla enintään 9 metriä. (51.)

## **6.2 Palo-osastointi**

Pääsääntöisesti rakennus on jaettava palo-osastoihin. Rakennuksen palo-osastoinnilla pyritään rajoittamaan palon ja savun leviäminen, turvataan rakennuksesta poistuminen sekä helpotetaan pelastus- ja sammutustoimien suorittamista. Palo-osastointi on osa rakenteellista paloturvallisuutta, ja se toteutetaan osastovallalla rakennusosalla, joka rajoittaa palon ja savun leviämistä vaaditun palonkestojan. (51.)

Palo-osastointi jaetaan kolmeen eri osastointilajiin: kerrososastointiin, käyttöpaosastointiin ja pinta-alaosastointiin. Kerrososastoinnilla tarkoitetaan rakennuksen eri kerroksien, kellarikerroksen ja ullakotilan muodostamista omiksi palo-osastoiksi. Pinta-alaosastoinnilla tarkoitetaan palo-osaston koon rajoittamista siten, että osastossa syttyvä palo ei aiheuttaisi kohtuuttomia omaisuusvahinkoja. Käyttötavaltaan tai palokuormaltaan oleellisesti toisistaan poikkeavien tilojen muodostamista omiksi palo-osastoiksi kutsutaan käytötaoasastoinniksi. (51.)

P1-paloluokan rakennuksessa on käytettävä kerrososastointia, eli rakennuksen eri kerrokset, kellarikerrokset ja ullakko on muodostettava eri palo-osastoiksi. Kuitenkin rakennuksessa, jonka korkeus ylittää 28 metriä, 28 metrin korkeuden yläpuolella porrashuonetta lukuun ottamatta enintään kaksi kerrosta voi olla samaa palo-osastoa, jos palo-osaston koko ei ylitä 2400 neliömetriä. Yli 56 metrin korkeudella palo-osaston on rajoitettava yhteen kerrokseen lukuun ottamatta porrashuoneita ja asuinhuoneistoja, joissa sallitaan kahden kerroksen palo-osastot. Tällöin kuitenkin asuinhuoneistosta on järjestettävä pääsy uloskäytävään kummastakin kerroksesta. (51.)

Asuinkerrostalossa osastointi tehdään huoneistoittain eli jokainen asuinhuoneisto muodostaa oman palo-osaston. Lisäksi poistumisportaitko ja kerroskäy-

tävä palo-osastoidaan. Asuinkerrostalon kohdalla kerrossosastointi yleensä toteutuu, kun jokainen huoneisto muodostaa oman palo-osaston. Jokainen huoneisto, kerros ja kerrosten läpi menevät tilat, kuten hissikuilu ja porraskäytävä, osastoidaan omiksi palo-osastoikseen. (51.)

Yli 56 metriä korkean rakennuksen osastoivien rakennusosien luokkavaatimus on EI 60 enintään 1 200 MJ/m<sup>2</sup> palokuormaryhmään kuuluville tiloille ja yli 1 200 MJ/m<sup>2</sup> palokuormaryhmään kuuluville tiloille luokkavaatimus on EI 90. Osastoivissa rakennusosissa käytettäville rakennustarvikkeille asetetaan luokkavaatimus A2-s1, d0 yli kaksikerroksisen P1-luokan rakennuksen uloskäytävien osastoivissa seinissä sekä kellaritilojen osastoinnissa. (51.)

Palo-osastot erottavan oven tulee olla itsestään sulkeutuva ja salpautuva. Suljin edellytetään yli 56 metriä korkeiden rakennusten asuinhuoneistojen kerrostasovissa. Jos osastoivaa ovea pidetään auki normaalikäytössä, se on varustettava automaattisella laitteella, joka sulkee oven palotilanteessa. (51.)

Yli 52 metriä korkeissa rakennuksissa täytyy olla myös vähintään kaksi toisistaan erillistä uloskäytävää. Molempien uloskäytävien tulee olla palolta suojattuja ja toisen myös savulta suojattu uloskäytävä. Korkea rakennus tulee varustaa myös pelastus- ja sammutustyössä käytettävällä palomieshissillä, jota on voitava käyttää sisäänkäyntitason yläpuolisissa tiloissa. (51.)

### **6.3 Sprinklerijärjestelmät**

Tarkoitukseen sopiva ja hätäkeskukseen kytketty automaattinen sammutuslaitteisto on oltava P1-paloluokan rakennuksessa, jonka korkeus on yli 56 metriä. Rakennus on varustettava myös tarkoitukseen sopivalla kiinteästi asennetulla sammutusveden siirtämiseen tarkoitetulla putkistolla sisäänkäyntitason yläpuolisissa tiloissa, kun ylimmän kerroksen lattian etäisyys ylittää 24 metriä rakennuksen sisäänkäyntitasosta. (51.)

Korkeissa rakennuksissa sprinklerijärjestelmä kattaa jokaisen huoneiston. SFS 5980 Asuntosprinklauslaitteistot mukaisesti kaikki rakennuksessa tai sen yhteydessä olevat tilat tulee suojata, kun tarve rakennuksen suojaukseen sprinklerijär-

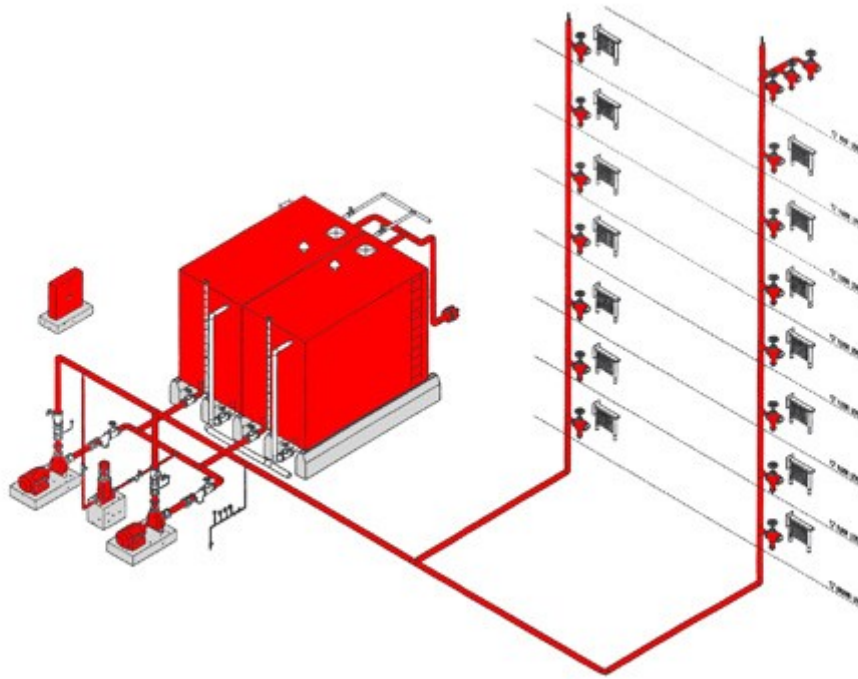
jestelmällä on todettu. Sprinklerisuojauksen tarpeellisuutta voidaan kuitenkin harvinaisista palamattomista materiaaleista tehtyjen WC- ja kylpyhuonetilojen, suljettujen porrashuoneiden ja pystysuorien kuilujen tapauksessa sekä tiloissa, joiden suojaukseen on käytetty muita automaattisia sammutuslaitteistoja kuten kaasua tai jauhelaitteistoja. (53.)

Rakennuksissa, joissa järjestelmän ylimmän ja alimman sprinklerin korkeusero ylittää 45 metriä, sprinklerijärjestelmälle tulisi tehdä vyöhykejako. Vyöhykejaolla järjestelmän paine ei kasva liian suureksi. Yhtä vyöhykettä palvelevan järjestelmän ylimmän ja alimman sprinklerin korkeusero tulisi olla maksimissaan 45 metriä. (54, s.126-127.)

Korkean rakennuksen sprinklerijärjestelmä suunnitellaan OH3-luokan mukaisesti. Vyöhykkeisiin jaettu asennus ei saa sisältää OH3-luokkaa korkeammin luokiteltuja osia. Suurempaa kuin OH3-luokan suojausta vaativien kohteiden suunnittelu edellyttää paloteknisiä ratkaisuja, joista tulee neuvotella alan erikoisasiantuntijan kanssa. (54, s.126–127.)

Korkean rakennuksen sprinklerijärjestelmällä tulee olla vähintään yksi varmennettu yksinkertainen vesilähde. Varmennetuksi yksinkertaiseksi vesilähteeksi hyväksytään tietyin edellytyksin yleinen vesijohto, vesisäiliö tai ehtymätön vesivarasto. Yleisen vesijohdon tulee olla molemmilta suunnilta syötetty ja laitteiston vaatima virtaama saadaan erikseen kummastakin virtaussuunnasta. Jos tarvittavaa painetta ei saada, tulee asentaa paineenkorotuspumppu. Vesilähteenä käytettävän vesisäiliön tulee olla täyden tilavuuden säiliö eli säiliön tehollisen tilavuuden tulee olla vähintään sama kuin määritetty vesimäärä. Ehtymättömällä vesivarastolla tarkoitetaan luonnon vesiä, kuten järvi tai joki. (54, s. 35–36, 127.)

Yleisin käytössä oleva sprinklerilaitteistotyyppi on märkäasennus (kuva 13), joka on normaalitilassa täytetty paineellisella vedellä. Märkäasennuksen ongelma on sprinklerisuuttimien laukeamisesta aiheutuva vesivahingon laajuus. Muita korkeisiin rakennuksiin soveltuvia järjestelmiä ovat matalapainesumu- ja korkeapainesumujärjestelmät. Vesisumujärjestelmät tuottavat korotetulla paineella vedestä vesisumua, joka jäähdyy tehokkaasti tilaa ja savukaasuja. Vesisumujärjestelmien etuna on pienemmät vesivahingot sammutustilanteessa. (50.)



*KUVA 13. Märkäasennussprinklerijärjestelmä (55)*

Sprinkleristä saatava virtaama voidaan laskea kaavalla 10 (54).

$$Q = K\sqrt{P}$$

*KAAVA 10*

missä,

$Q$  on virtaama sprinkleristä (l/min)

$K$  on kerroin (-)

$P$  on suuttimen paine (bar)

Putkistossa virtauksen aiheuttama painehäviö voidaan laskea kaavalla 11 (54).

$$p = \frac{6,05 \cdot 10^5}{c^{1,85} d^{4,87}} * L * Q^{1,85}$$

*KAAVA 11*

missä,

$p$  on virtauksen aiheuttama painehäviö (bar)

$C$  on putken laatua vastaava kerroin (-)

$d$  on putken sisähalkaisija (mm)

$L$  on putken ekvivalenttipituus (m)

$Q$  on virtaama putkessa (l/min)

Hydrostaattinen paine-ero putkiston kahden pisteen välillä voidaan laskea kaavalla 12 (54).

$$p = 0,098 h$$

KAAVA 12

missä,

$p$  on hydrostaattinen paine-ero (bar)

$h$  on pisteiden välinen korkeusero (m)

#### 6.4 Savunhallinta

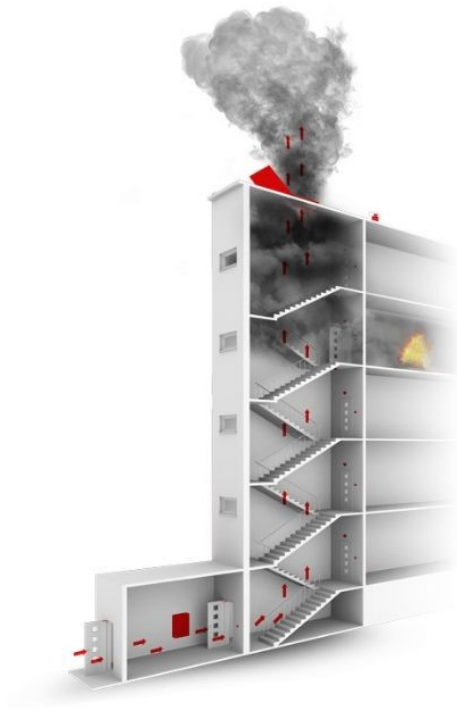
Osastoidusta uloskäytävästä ja osastoidusta hissikuilusta on järjestettävä mahdollisuus savunpoistoon sekä korvaavan ilman virtaamiseen. Kellarikerroksen tiloista on oltava savunpoistomahdollisuus niin, ettei osastoituja uloskäytäviä eikä osastoituja sammutusreittejä tarvitse käyttää savunpoistoon. Savunpoisto on järjestettävä erityistoimenpitein kuten savunpoistoluukkujen, -ikkunoiden, -puhaltimien tai huonetilojen yläosassa sijaitsevien helposti avattavien ikkunoiden avulla. (51.)

Palopesäkkeessä muodostuva savu on ympäröivää ilmaa kevyempää ja nousee tilan yläosaan leviten katon rajassa. Savunpoistolaitteistolla poistetaan palon alkuvaiheessa savua ja lämpöä tilan yläosasta ja luodaan savuton vyöhyke tilan alaosaan. Savu poistetaan seinälle tai kattoon asennetuilla savunpoistoluukuilla,

-ikkunoilla tai -puhaltimilla, ja tilalle johdetaan puhdasta korvausilmaa. Savunpoistolaitteisto toimii joko koneellisesti tai painovoimaisesti, ja se käynnistyy automaattisesti tai käsin laukaisemalla. (56; 57, s.17, 19.)

#### 6.4.1 Painovoimainen savunpoisto

Painovoimaisen savunpoiston (kuva 14) toiminta perustuu kaasun lämpötilaeron aiheuttamaan nosteeseen. Savunpoistossa on otettava huomioon nosteen lisäksi hormivaikutus ja tuuli. Ei voida olettaa, että tuuli vaikuttaisi savunpoistoon myönteisesti. Se voi myös vaikeuttaa savun poistumista. Hormivaikutus aiheutuu sisätilojen ja ulkoilman lämpötilaerosta, joka vaihtelee huomattavasti ja on huonosti ennakoitavissa. Sen vuoksi painovoimaisen savunpoiston tehon aiheuttaa lähinnä noste, jota tuuli ja hormivaikutus joko tehostaa tai heikentää. (58, s.3.226.)



*KUVA 14. Painovoimaisen savunpoiston toimintaperiaate (muokattu: 59)*

Savukaasun lämpötilan kasvaessa myös nosteen vaikutus kasvaa. Siksi savukaasu ei saa päästä laajenemaan liiaksi, jolloin savukaasun lämpötila laskisi. Sitä voidaan hallita jakamalla suuret tilat pienempiin savulohkoihin. Lisäksi lohkot auttavat hidastamaan savun leviämistä. Koska nosteen aiheuttama paine-ero on

suurin katonrajassa, tulisi savunpoistoluukut sijoittaa tilan yläosaan ja korvaus- ilma-aukot tilan alaosaan. Monikerroksisissa rakennuksissa savunpoistossa voidaan käyttää savunpoistokuiluja ja kuilun yläpäähän sijoitettuja luokkuja. (57 s. 50.)

Savunpoistokuilu koostuu kanavasta, jossa on luukku tai muu aukko kerrokseen ja suurempi luukku ulkoilmaan rakennuksen katolla. Savunpoistokuilussa paine on pienempi verrattuna kerroksissa vallitsevaan paineeseen koko rakennuksen matkalla. Paloalueella savunpoisto aiheuttaa tilaan suhteellisen alipaineen. Siitä seuraa, että alueen ilmavuotojen virtaukset suuntautuvat paloa kohden. Savunpoisto imee alueelta savukaasut itseensä, ja rakennukset muut alueet pysyvät savuttomina. (60.)

Kesäolosuhteissa hormivaikutus ei välttämättä synny heti savunpoistokuiluun. Sen vuoksi voi olla suositeltavaa asentaa kuiluun puhallin sen sijaan, että odottaa savukaasujen lämmittävän kuilun. (60.)

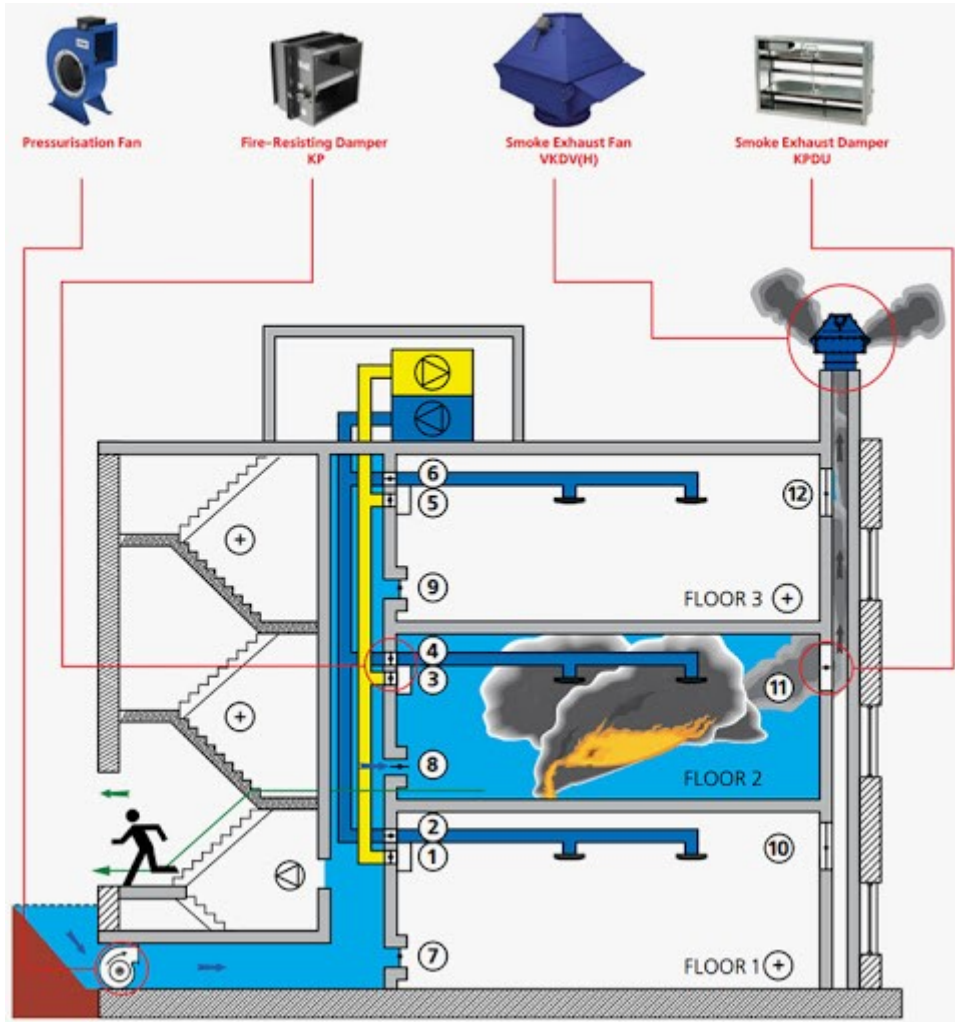
Painovoimaisessa savunpoistossa on huomioitava, että ikkunan rikkoutuminen paloalueella kumoaa hormivaikutuksen. Silloin paloalueen paineolosuhteet muuttuvat vastaamaan ulkoilman painetta. Seurauksena palokaasut leviävät paloalueelta viereisille alueille. (60.)

Korkeassa rakennuksessa painovoimaisen savunpoiston käyttömahdollisuutta rajoittaa savunpoistoluukkujen suuri tilan tarve rakennuksen katolla. Lisäksi on huomioitava savunpoistokuilun likaantumisen mahdollisuus, joka heikentää kaasun virtausta kuilussa. (60.)

#### **6.4.2 Koneellinen savunpoisto**

Koneellisessa savunpoistossa (kuva 15) savunpoistoluukkujen tilalla on savunpoistopuhaltimet ja kanavat. Savunpoiston korvausilmajärjestelmä on myös mahdollista toteuttaa koneellisesti. Koneellinen korvausilmajärjestelmä parantaa savunpoiston ilmavirtojen hallintaa, mutta siitä huolimatta avoimet ovet ja ikkunat voivat aiheuttaa haasteita. Ongelmia voi seurata siitäkin, että koneellisen savunpoiston ilmavirrat on suunniteltu mitoituspalolle. Suuremman palon sattuessa suunnitellut virtausmäärät eivät välttämättä riitäkään savunhallintaan. Tuuli ja

hormivaikutus vaikuttavat myös koneelliseen savunpoistojärjestelmään, mutta huomattavasti vähemmän, kuin painovoimaiseen, sillä savun poistumiseen vaikuttaa nosteen lisäksi puhaltimen imuvaikutus. (61, s.1843.)



*KUVA 15. Esimerkki koneellisen savunpoistojärjestelmän ja paineistuksen toimintaperiaatteesta (62).*

Koneellinen savunpoisto soveltuu erityisesti kohteisiin, joissa savu poistetaan kanavia pitkin ja savupatjan keskimääräinen lämpötila pysyy suhteellisen matalana. Savukaasujen lämpötila pysyy alhaisena esimerkiksi sellaisissa kohteissa, jotka on varustettu automaattisella sammutuslaitteistolla. Koneellinen savunpoisto soveltuu sekä monikerroksisiin rakennuksiin että maanalaisiin tiloihin. (57, s. 50–51.)

### 6.4.3 Paineistus

Paineistuslaitteistolla saadaan aikaan paine-ero suojattavan tilan ja palotilan välille. Porrashuoneet ja poistumiskäytävät saadaan pysymään savuttomina poistumiseen ja pelastamiseen tarvittavan ajan ylipaineistamalla tila. Ylipaine ei kuitenkaan saa olla liian suuri niin, että se vaikeuttaisi esimerkiksi poistumisreitillä olevien ovien avaamista. Ylipaineistusta käytetään esimerkiksi korkeissa rakennuksissa ja vaativissa maanalaisissa tiloissa. (56.) Paineistusjärjestelmän tulisi käynnistyä mahdollisimman aikaisin palon alkuvaiheessa, jotta poistumistiet pysyvät savuttomina. Paineistusjärjestelmä voi pitää tilat jatkuvasti hieman ylipaineisina ja tehostaa sitä palon alkaessa. (63, s. 32, 51.)

Paineistuksen toiminnan kannalta on tärkeää, että ilma pääsee purkautumaan paineistamattomista tiloista ulos purkautumisreittejä pitkin. Tällöin ilman virtaus suuntautuu paineistetuista tiloista pois päin ja savukaasujen virtaaminen suojeltuihin tiloihin estyy. Paineistusjärjestelmän ei ole tarkoitus pidätellä savukaasujen leviämistä täyden palamisen vaiheessa, vaan ihmisten evakuoinnin ajan. (63, s.38, 51.)

Suojeltujen tilojen ylipaineistus ei saa hankaloittaa poistumisteiden ovien avaamista. Palohuoneiston ja porraskäytävän väliselle paine-erolle on olemassa raja-arvot, jotta ovien avaus on mahdollista, mutta ilman virtaus paineistetuista tiloista pois toteutuu. Paine-eron aiheuttama oven avaamiseen tai sulkemiseen tarvittava voima ei saa ylittää 100 N:a. (57 s. 126, 128.) Käytännössä paine-eron hallinta alle määritellyn raja-arvon voi olla haastavaa tilanteessa, jossa porrashuoneen ylipaineistus toteutetaan samanaikaisesti kerroksen alipaineistuksen kanssa ja hormivaikutus aiheuttaa paineen vaihtelua rakennuksessa (64).

Porrashuoneen paineistuksen suunnittelussa tulisi myös huomioida evakuointitilanteessa avattavien ovien määrä, sillä ovien avaaminen vaikuttaa painetasoon. Avatun oven kautta ilma vuotaa porrashuoneesta kerrokseen ja paine-ero tilojen välillä tasaantuu. Hyvin toimivalle paineistusjärjestelmälle on siksi asetettava myös minimipaine. (64.)

Ovien ja rakojen ilmavuodot voidaan laskea kaavalla 13 (63).

$$Q = 0,83 A_e P^{1/R}$$

KAAVA 13

missä,

$Q$  on vuotovirtaus paineistetusta tilasta ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$A_e$  on aukkojen tehollinen virtausala ( $\text{m}^2$ )

$P$  on paine-ero paineistetun ja paineistamattoman tilan välillä (Pa)

$R$  on kerroin, joka riippuu raon suuruudesta, yleensä 2 (-)

Oven avaamiseen tarvittavan voiman voidaan laskea kaavalla 14 (63).

$$P_{max} = \frac{2(100 - F_{dc})(W_d - d)}{D_A * W_d}$$

KAAVA 14.

missä,

$P_{max}$  oven aukaisuvoiman maksimiarvoa vastaava paine-ero (Pa)

$F_{dc}$  oven aukaisuun tarvittava voima normaalitilanteessa (N)

$W_d$  oven leveys (m)

$d$  oven kahvan etäisyys oven reunasta (m)

$D_A$  oven pinta-ala ( $\text{m}^2$ )

## 7 ESIMERKKILASKELMAT

Tässä opinnäytetyössä käytetään esimerkkikohteena kuvitteellista 80 metriä korkeaa rakennusta. Rakennus on 23-kerroksinen ja kerroskorkeus on 3,5 metriä. Tässä luvussa esitetään laskelmia hydrostaattisen paineen vaikutuksesta käyttövesi- ja lämmitysverkostoon, hormivaikutuksen ja tuulen yhteisvaikutuksesta rakennuksen paine-eroihin, korkeiden rakennusten sprinklerilaitteiston erityisvaatimuksista, ja savulta suojattavan porrashuoneen ylipaineistuksesta.

### 7.1 Vyöhykejaon vaikutus käyttöveden paineeseen

Esimerkkirakennuksessa on 23 maanpäällistä kerrosta. Kerroskorkeus on 3,5 metriä. Vesijohtoverkosto on jaettu neljään vyöhykkeeseen. Vesijohtoverkoston paineenkorotus toteutetaan kahdella paineenkorotusasemalla. Vesijohtoverkoston ensimmäinen vyöhyke toimii kunnallisen vesijohtoverkoston paineella. Toiselle vyöhykkeelle on oma paineenkorotusasema. Kolmannen ja neljännen vyöhykkeen paineenkorotus toteutetaan yhdellä paineenkorotusasemalla.

Esimerkkitapauksessa verkostolle käytettävissä oleva painetaso vesimittarin jälkeen on 450 kPa. Esimerkissä tarkastellaan vesijohtoverkoston kylmävesipuolta, jolloin veden tiheys on  $999,96 \text{ kg/m}^3$ . Vyöhykkeiden ylimpien kerrosten putkille ja vesikalusteille varataan käyttöpainetta 250 kPa verran. Yksinkertaistuksena putkistojen painehäviöiden laskennassa huomioidaan vain nousujen painehäviöt. Taulukossa 1 näkyy laskennan lähtöarvot.

TAULUKKO 1. Lähtöarvot

| Suureen tunnus             | Lukuarvo | Yksikkö         | Suure                            |
|----------------------------|----------|-----------------|----------------------------------|
| $\Delta p_h$               | 450      | kPa             | Vesimittarin jälkeinen painetaso |
| R                          | 0,5      | kPa/m           | Kitkavastukset                   |
| $\Delta p_{\text{varaus}}$ | 250      | kPa             | Vaadittu painetaso kerroksessa   |
| h                          | 80       | m               | Rakennuksen korkeus              |
| $h_k$                      | 3,5      | m               | Kerroskorkeus                    |
| g                          | 9,81     | $\text{m/s}^2$  | Putoamiskiikkyvyys               |
| $\rho$                     | 999,96   | $\text{kg/m}^3$ | Veden tiheys (+5 °C)             |

Ensimmäisenä lasketaan, kuinka monta kerrosta voidaan toteuttaa kunnallisen vesijohtoverkoston paineella ilman paineenkorotusta. Laskemiseen käytetään kaavaa 1. Taulukossa 2 on esitetty laskelmien tulokset 250 kPa painetason toteutumisesta viidennessä kerroksessa, eli 17,5 metrin korkeudella. Jotta kerroksessa päästään vaadittuun 250 kPa:n painetasoon ilman paineenkorotusta, tulee vesimitarin jälkeen käytettävissä oleva paine olla 430 kPa. Esimerkissä vesimitarin jälkeen on käytettävissä 450 kPa, jolloin viidenteen kerrokseen ei tarvita paineenkorotusta. Ensimmäiseen vyöhykkeeseen sisältyy kerrokset 1–5.

*TAULUKKO 2. Tarvittava paine viidenteen kerrokseen*

| Suureen tunnus             | Lukuarvo | Yksikkö | Suure                          |
|----------------------------|----------|---------|--------------------------------|
| $p$                        | 171,7    | kPa     | Hydrostaattinen paine          |
| $\Delta p_d$               | 8,8      | kPa     | Dynaaminen painehäviö          |
| $\Delta p_{\text{varaus}}$ | 250,0    | kPa     | Vaadittu painetaso kerroksessa |
| $\Delta p$                 | 430,4    | kPa     | Tarvittava paine               |

Loput 18 kerrosta jaetaan kolmeen vyöhykkeeseen siten, että jokaiseen vyöhykkeeseen kuuluu kuusi kerrosta. Toinen vyöhyke käsittää kerrokset 6–11. Taulukossa 3 on esitetty tulokset paineenkorotustarpeesta. Kerroksen 11 korkeus maanpinnasta on 38,5 metriä. Paineenkorotusasema nostaa painetason 647 kPa:iin.

*TAULUKKO 3. Tarvittava paine 11. kerrokseen*

| Suureen tunnus             | Lukuarvo | Yksikkö | Suure                          |
|----------------------------|----------|---------|--------------------------------|
| $p$                        | 377,7    | kPa     | Hydrostaattinen paine          |
| $\Delta p_d$               | 19,3     | kPa     | Dynaaminen painehäviö          |
| $\Delta p_{\text{varaus}}$ | 250,0    | kPa     | Vaadittu painetaso kerroksessa |
| $\Delta p$                 | 646,9    | kPa     | Tarvittava paine               |

Vyöhyke 3 ja 4 toteutetaan yhdellä paineenkorotusasemalla, joka nostaa paineen sellaiselle tasolle, että 23. kerroksen vesikalusteiden ja putkiston käytettävissä oleva paine on 250 kPa. Taulukossa 4 on esitetty tulokset ylimmän kerroksen paineenkorotustarpeesta.

*TAULUKKO 4. Tarvittava paine ylimmässä kerroksessa*

| Suureen tunnus             | Lukuarvo | Yksikkö | Suure                          |
|----------------------------|----------|---------|--------------------------------|
| $p$                        | 784,8    | kPa     | Hydrostaattinen paine          |
| $\Delta p_d$               | 40,0     | kPa     | Dynaaminen painehäviö          |
| $\Delta p_{\text{varaus}}$ | 250,0    | kPa     | Vaadittu painetaso kerroksessa |
| $\Delta p$                 | 1074,8   | kPa     | Tarvittava paine               |

Seuraavaksi lasketaan tarvittava paine kolmannen vyöhykkeen ylimpään kerrokseen. Tulokset on esitetty taulukossa 5. 17. kerrokseen tarvittava paine on 863 kPa.

*TAULUKKO 5. Tarvittava paine 17. kerrokseen*

| Suureen tunnus             | Lukuarvo | Yksikkö | Suure                          |
|----------------------------|----------|---------|--------------------------------|
| $p$                        | 583,7    | kPa     | Hydrostaattinen paine          |
| $\Delta p_d$               | 29,8     | kPa     | Dynaaminen painehäviö          |
| $\Delta p_{\text{varaus}}$ | 250,0    | kPa     | Vaadittu painetaso kerroksessa |
| $\Delta p$                 | 863,4    | kPa     | Tarvittava paine               |

Paineenkorotuksen vuoksi kolmannen vyöhykkeen alimmassa kerroksessa, eli 12. kerroksessa, on painetta käytettävissä 642 kPa (taulukko 6). Koska paine ylittää 500 kPa, täytyy käyttää vyöhykekohtaista paineenalennusventtiiliä. Paineenalennusventtiili voidaan säätää alentamaan painetta 210 kPa:n verran, jolloin venttiilin jälkeinen käytettävissä oleva painetaso kolmannelle vyöhykkeelle on 863 kPa. Vyöhykkeen alimmassa kerroksessa käytettävissä oleva painetaso alenee 432 kPa:iin. Tällöin vyöhykkeen ylimmän kerroksen käytettävissä oleva painetaso on 251 kPa.

TAULUKKO 6. Paineenalennus vyöhykkeelle kolme

| Suureen tunnus | Lukuarvo | Yksikkö | Selite                          |
|----------------|----------|---------|---------------------------------|
| $\Delta p$     | 1074,8   | kPa     | Paine korotuksen jälkeen        |
| $\Delta p$     | 641,8    | kPa     | Paine 12. kerroksessa           |
| $\Delta p_v$   | 210,0    | kPa     | Paineenalennusventtiili         |
| $\Delta p$     | 864,8    | kPa     | Paine venttiilin jälkeen        |
| $\Delta p$     | 431,8    | kPa     | Alennettu paine 12. kerros      |
| $\Delta p$     | 251,3    | kPa     | Alennettu paine 17. kerroksessa |
| $\Delta p$     | 425,3    | kPa     | Paine 18. kerroksessa           |

## 7.2 Korkeuden vaikutus lämmityslinjaan

Korkea rakennus liitetään kaukolämpöön, ja toisiopuolen menoveden lämpötila on 60 °C. Jos 80 metriä korkean rakennuksen kaikki lämmönsiirtimet sijoitetaan 1. kerroksen lämmönjakohuoneeseen, korkeimman vyöhykkeen nousuputkessa staattinen paine on (kaavalla 1)

$$p = \frac{983,2 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2} * 80 m}{1000} = 771,6 kPa$$

K1/2013 mukaan lämmitysverkoston suurin sallittu käyttöpaine toisiopuolella on 600 kPa. Korkeimman vyöhykkeen lämmitysverkoston lämmönsiirrintä ei voi sijoittaa ensimmäisen kerroksen lämmönjakohuoneeseen, koska verkoston korkeuden vuoksi suurin käyttöpaine ylittyy. Siitä syystä tulee käyttää välisiirrintä lämmönjakohuoneessa, josta lämpö siirtyy korkeapainenusulinjan kautta varsinaiselle lämmitysverkoston lämmönsiirtille. Lämmitysverkoston lämmönsiirrin sijaitsee vyöhykkeen korkeudella.

## 7.3 Tuulen vaikutus paine-eroihin

Tuuli aiheuttaa rakennuksen tuulenpuoleisen seinän sisäpuolelle alipaineen. Jotta tuulen aiheuttama paine voidaan laskea, tulee tietää tuulen nopeudet eri korkeuksissa. Tuulennopeus tietyllä korkeudella lasketaan kaavalla 3. Säänmittausasemalla mitattu tuulennopeus on 10 m/s. Mittausaseman korkeus maanpinnasta on 10 m. Säänmittausaseman ympäristö kuuluu taulukon 7 mukaisesti

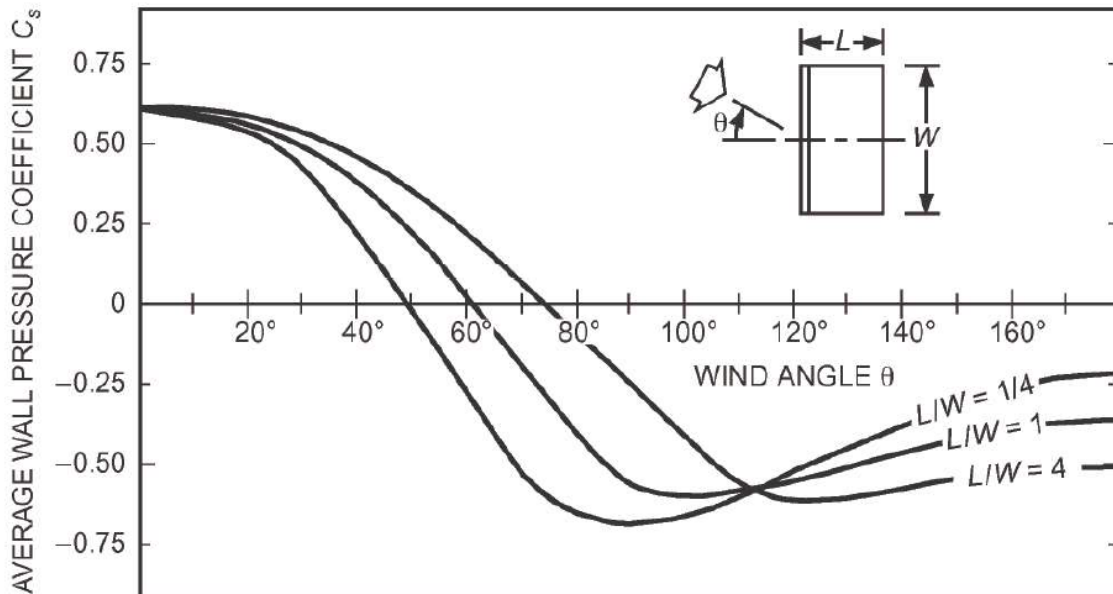
maastokategoriaan 3. Rakennuksen ympäristössä muu rakennuskanta on matalaa, jolloin rakennuksen ympäristö kuuluu kategoriaan 2.

TAULUKKO 7. Ilmakehän rajakerroksen parametrit (46, s. 24.4)

| Maastokategoria | Kuvaus  | EkspONENTTI a | Kerrospaksuus $\delta$ , [m] |
|-----------------|---|---------------|------------------------------|
| 1               | Suuret kaupunkien keskustat, joissa rakennusten keskikorkeus yli 25 m   | 0,33          | 460                          |
| 2               | Taajama-alueet, puustoiset alueet, tai muut tiheään rakennetut alueet   | 0,22          | 370                          |
| 3               | Avoin maasto, jossa paikoittaisia esteitä, joiden korkeus on alle 9 m. Tyypillinen säänmittausaseman ympäristö. | 0,14          | 270                          |
| 4               | Aava esteetön alue. Ei tuulen suojaa.   | 0,10          | 210                          |

$$U_h = 10 \frac{m}{s} \left( \frac{270 m}{10 m} \right)^{0,14} \left( \frac{80 m}{370 m} \right)^{0,22} = 11,33 \frac{m}{s}$$

Säänmittausasemalla mitatun tuulenopeuden perusteella laskettu rakennuksen ympäristön tuulenopeus on 11,33 m/s 80 metrin korkeudella. Saadulla tuulenopeudella lasketaan tuulen aiheuttama painerasitus rakennuksen ulkoseinälle (kaava 2).



KUVA 16. Keskimääräisiä tuulenpainekertoimia korkean rakennuksen seinille seinänpituussuhteiden ja tuulen kulman mukaisesti (46, s. 24.6).

Esimerkkirakennus on tasasivuinen, jolloin tuulenkulman muuttuessa tuulenpainekerroin vaihtelee  $L/W=1$  kuvaajan mukaisesti (kuva 16). Tuulenpuoleiselle seinälle tuulenpainekerroin on noin 0,6. Suojanpuoleisella seinällä kerroin on  $-0,4$  ja tuulensuuntaisella seinällä  $-0,6$ . Taulukossa 8 on esitetty tuulen aiheuttamat painerasitukset jokaisen kerroksen ulkoseinille.

$$p_s = 0,6 * \frac{1}{2} * 1,2 \frac{kg}{m^3} * \left(11,33 \frac{m}{s}\right)^2 = 46,18 Pa$$

TAULUKKO 8. Tuulen aiheuttamat painerasitukset rakennuksen seinille.

| Kerros | Korkeus [m] | Tuulennopeus [m/s] | Painerasitus [Pa]     |                       |                        |
|--------|-------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
|        |             |                    | Tuulenpuoleinen seinä | Suojanpuoleinen seinä | Tuulensuuntainen seinä |
| 1      | 3,5         | 7,17               | 18,50                 | -12,33                | -18,50                 |
| 2      | 7,0         | 7,17               | 18,50                 | -12,33                | -18,50                 |
| 3      | 10,5        | 7,25               | 18,90                 | -12,60                | -18,90                 |
| 4      | 14,0        | 7,72               | 21,45                 | -14,30                | -21,45                 |
| 5      | 17,5        | 8,11               | 23,66                 | -15,77                | -23,66                 |
| 6      | 21,0        | 8,44               | 25,64                 | -17,09                | -25,64                 |
| 7      | 24,5        | 8,73               | 27,44                 | -18,29                | -27,44                 |
| 8      | 28,0        | 8,99               | 29,10                 | -19,40                | -29,10                 |
| 9      | 31,5        | 9,23               | 30,64                 | -20,43                | -30,64                 |
| 10     | 35,0        | 9,44               | 32,10                 | -21,40                | -32,10                 |
| 11     | 38,5        | 9,64               | 33,47                 | -22,31                | -33,47                 |
| 12     | 42,0        | 9,83               | 34,78                 | -23,19                | -34,78                 |
| 13     | 45,5        | 10,00              | 36,02                 | -24,02                | -36,02                 |
| 14     | 49,0        | 10,17              | 37,22                 | -24,81                | -37,22                 |
| 15     | 52,5        | 10,32              | 38,37                 | -25,58                | -38,37                 |
| 16     | 56,0        | 10,47              | 39,47                 | -26,31                | -39,47                 |
| 17     | 59,5        | 10,61              | 40,54                 | -27,03                | -40,54                 |
| 18     | 63,0        | 10,75              | 41,57                 | -27,71                | -41,57                 |
| 19     | 66,5        | 10,87              | 42,57                 | -28,38                | -42,57                 |
| 20     | 70,0        | 11,00              | 43,54                 | -29,03                | -43,54                 |
| 21     | 73,5        | 11,12              | 44,49                 | -29,66                | -44,49                 |
| 22     | 77,0        | 11,23              | 45,41                 | -30,27                | -45,41                 |
| 23     | 80,0        | 11,33              | 46,18                 | -30,79                | -46,18                 |

Hormivaikutuksen aiheuttaman paine-eron selvittämistä varten lasketaan kostealle ulko- ja sisäilmalle tiheydet käyttäen kaavoja 5, 6, 7, 8. Taulukossa 9 on esitetty ilman tiheys mitoituskäytön lämpötilassa.

TAULUKKO 9. Kostean ilman tiheys mitoituslämpötilassa

| Suureen tunnus | Lukuarvo  | Yksikkö           | Suure                      |
|----------------|-----------|-------------------|----------------------------|
| $T_o$          | -32       | °C                | Lämpötila                  |
| $T_o$          | 241,15    | K                 | Lämpötila                  |
| $\psi_o$       | 75        | %                 | Suhteellinen kosteus       |
| $p_{atm}$      | 101325,00 | Pa                | Ilmanpaine                 |
| $p_{h'}$       | 40,21     | Pa                | Kylläisen vesihöyryn paine |
| $p_h$          | 30,16     | Pa                | Vesihöyryn osapaine        |
| $M_{id}$       | 0,028964  | kg/mol            | Kuivan ilman moolimassa    |
| $M_h$          | 0,018015  | kg/mol            | Veden moolimassa           |
| $R$            | 8,314     | J/mol*K           | Kaasuvakio                 |
| $\rho_{id}$    | 1,4634    | kg/m <sup>3</sup> | Kuivan ilman osatiheys     |
| $\rho_h$       | 0,0003    | kg/m <sup>3</sup> | Vesihöyryn osatiheys       |
| $\rho_o$       | 1,4636    | kg/m <sup>3</sup> | Kostean ilman tiheys       |

Taulukossa 10 on esitetty kostean sisäilman tiheys.

TAULUKKO 10. Kostean sisäilman tiheys

| Suureen tunnus | Lukuarvo  | Yksikkö           | Suure                      |
|----------------|-----------|-------------------|----------------------------|
| $T_i$          | 21        | °C                | Lämpötila                  |
| $T_i$          | 294,15    | K                 | Lämpötila                  |
| $\psi_i$       | 30        | %                 | Suhteellinen kosteus       |
| $p_{atm}$      | 101325,00 | Pa                | Ilmanpaine                 |
| $p_{h'}$       | 2528,38   | Pa                | Kylläisen vesihöyryn paine |
| $p_h$          | 758,51    | Pa                | Vesihöyryn osapaine        |
| $M_{id}$       | 0,028964  | kg/mol            | Kuivan ilman moolimassa    |
| $M_h$          | 0,018015  | kg/mol            | Veden moolimassa           |
| $R$            | 8,314     | J/mol*K           | Kaasuvakio                 |
| $\rho_{id}$    | 1,1911    | kg/m <sup>3</sup> | Kuivan ilman osatiheys     |
| $\rho_h$       | 0,0056    | kg/m <sup>3</sup> | Vesihöyryn osatiheys       |
| $\rho_i$       | 1,1966    | kg/m <sup>3</sup> | Kostean ilman tiheys       |

Esimerkkirakennus ei ole tasatiivis. Rakennuksen vuotoilma-aukot ovat jakautuneet epätasaisesti. Sen vuoksi neutraalin painetason sijainti ei ole korkeussuunnassa keskellä rakennusta. Rakennuksen alaosan vuotoaukkojen pinta-ala on 2 m<sup>2</sup> ja yläosassa 1,5 m<sup>2</sup>. Neutraalin painetason sijainti voidaan selvittää kaavalla

9. Neutraalin painetasen korkeusasema on 25,3 metriä. Neutraali painetaso muodostuu rakennuksen alaosaan päin, koska vuotoilma-aukot ovat alaosassa suuremmat kuin yläosassa.

$$h_{NPL} = \frac{80 \text{ m}}{1 + \left(\frac{2 \text{ m}^2}{1,5 \text{ m}^2}\right)^2 * \frac{294,15 \text{ K}}{241,15 \text{ K}}} = 25,3 \text{ m}$$

Hormivaikutuksen aiheuttama paine-ero 80 metrin korkeudella lasketaan kaavalla 4.

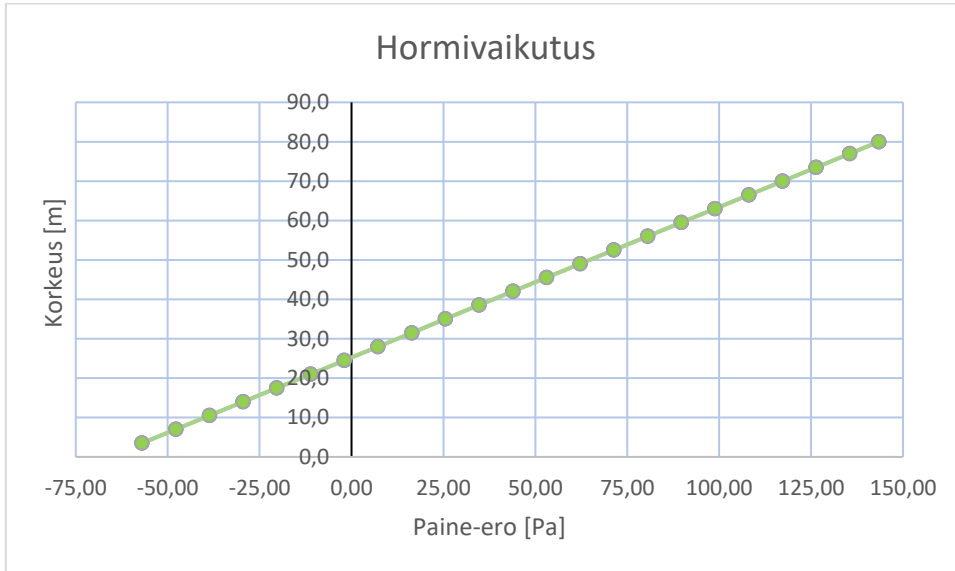
$$\Delta p = \left(1,197 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 1,464 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (80 - 25,3)\text{m} = 144,40 \text{ Pa}$$

Taulukossa 11 on esitetty kerroskohtaiset paine-erot.

**TAULUKKO 11. Kerroskohtaiset paine-erot**

| Kerros | Korkeus<br>[m] | Korkeusero (NPL)<br>[m] | Hormivaikutus<br>[Pa] |
|--------|----------------|-------------------------|-----------------------|
| 1      | 3,5            | -21,7                   | -56,96                |
| 2      | 7,0            | -18,2                   | -47,79                |
| 3      | 10,5           | -14,7                   | -38,63                |
| 4      | 14,0           | -11,2                   | -29,46                |
| 5      | 17,5           | -7,7                    | -20,29                |
| 6      | 21,0           | -4,2                    | -11,13                |
| 7      | 24,5           | -0,7                    | -1,96                 |
| 8      | 28,0           | 2,8                     | 7,21                  |
| 9      | 31,5           | 6,3                     | 16,37                 |
| 10     | 35,0           | 9,8                     | 25,54                 |
| 11     | 38,5           | 13,3                    | 34,71                 |
| 12     | 42,0           | 16,8                    | 43,87                 |
| 13     | 45,5           | 20,3                    | 53,04                 |
| 14     | 49,0           | 23,8                    | 62,21                 |
| 15     | 52,5           | 27,3                    | 71,37                 |
| 16     | 56,0           | 30,8                    | 80,54                 |
| 17     | 59,5           | 34,3                    | 89,71                 |
| 18     | 63,0           | 37,8                    | 98,87                 |
| 19     | 66,5           | 41,3                    | 108,04                |
| 20     | 70,0           | 44,8                    | 117,21                |
| 21     | 73,5           | 48,3                    | 126,37                |
| 22     | 77,0           | 51,8                    | 135,54                |
| 23     | 80,0           | 54,8                    | 143,40                |

Kuvassa 17 on esitetty hormivaikutuksen aiheuttama paineprofiili. Kuvasta on havaittavissa, että hormivaikutus aiheuttaa rakennuksen alaosaan 57 Pa:n alipaineen ja yläosaan 143 Pa:n ylipaineen.



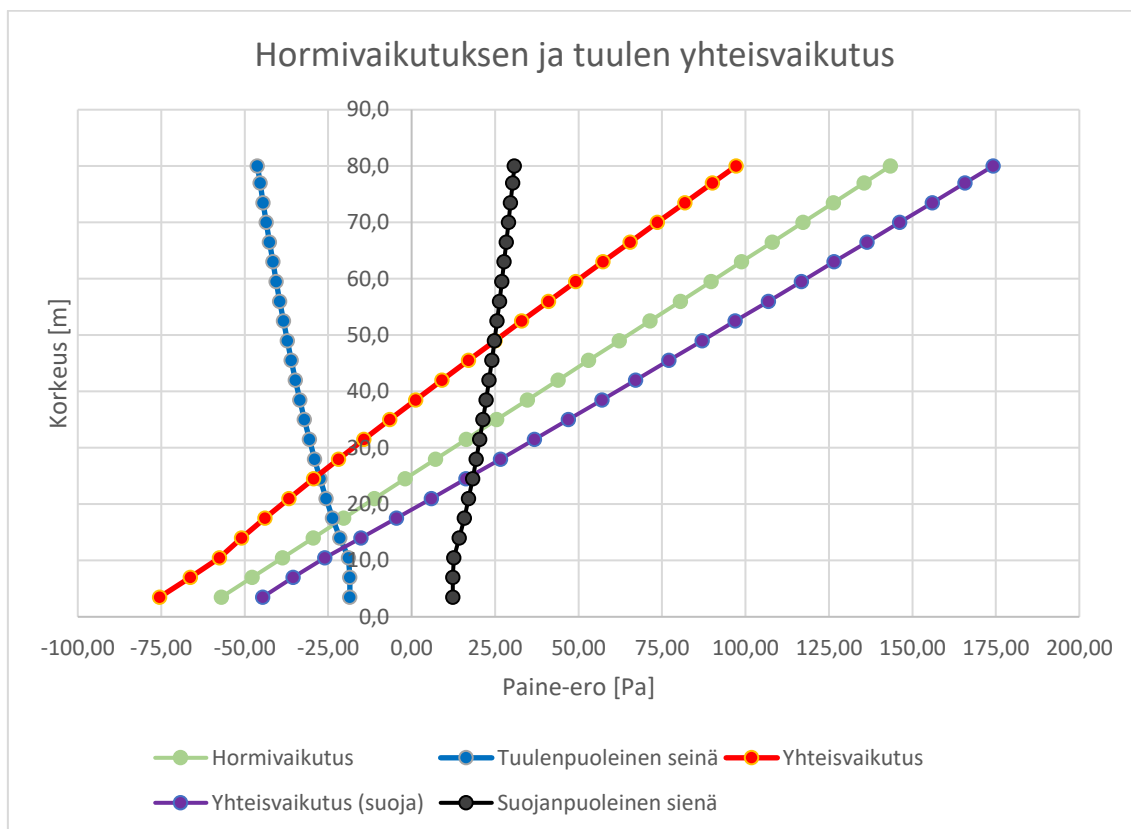
*KUVA 17. Hormivaikutuksen paineprofiili*

Taulukossa 12 on esitetty tuulen ja hormivaikutuksen yhteisvaikutus tuulenpuoleisella seinällä. Tuulen aiheuttama paine kuvataan käänteisenä, koska tuulenpuoleisella seinällä tuuli aiheuttaa alipaineen sisäseinälle. Yhteisvaikutus kuvaa siis rakennuksen sisäistä paine-eroa ulkoilmaan nähden.

TAULUKKO 12. Tuulen ja hormivaikutuksen yhteisvaikutus

| Kerros | Korkeus [m] | Hormivaikutus [Pa] | Tuulenpuoleinen seinä [Pa] | Yhteisvaikutus [Pa] |
|--------|-------------|--------------------|----------------------------|---------------------|
| 1      | 3,5         | -56,96             | -18,50                     | -75,46              |
| 2      | 7,0         | -47,79             | -18,50                     | -66,29              |
| 3      | 10,5        | -38,63             | -18,90                     | -57,52              |
| 4      | 14,0        | -29,46             | -21,45                     | -50,91              |
| 5      | 17,5        | -20,29             | -23,66                     | -43,95              |
| 6      | 21,0        | -11,13             | -25,64                     | -36,76              |
| 7      | 24,5        | -1,96              | -27,44                     | -29,40              |
| 8      | 28,0        | 7,21               | -29,10                     | -21,89              |
| 9      | 31,5        | 16,37              | -30,64                     | -14,27              |
| 10     | 35,0        | 25,54              | -32,10                     | -6,56               |
| 11     | 38,5        | 34,71              | -33,47                     | 1,23                |
| 12     | 42,0        | 43,87              | -34,78                     | 9,09                |
| 13     | 45,5        | 53,04              | -36,02                     | 17,01               |
| 14     | 49,0        | 62,21              | -37,22                     | 24,99               |
| 15     | 52,5        | 71,37              | -38,37                     | 33,01               |
| 16     | 56,0        | 80,54              | -39,47                     | 41,07               |
| 17     | 59,5        | 89,71              | -40,54                     | 49,17               |
| 18     | 63,0        | 98,87              | -41,57                     | 57,30               |
| 19     | 66,5        | 108,04             | -42,57                     | 65,47               |
| 20     | 70,0        | 117,21             | -43,54                     | 73,66               |
| 21     | 73,5        | 126,37             | -44,49                     | 81,88               |
| 22     | 77,0        | 135,54             | -45,41                     | 90,13               |
| 23     | 80,0        | 143,40             | -46,18                     | 97,22               |

Kuvassa 18 on esitetty hormivaikutuksen ja tuulen yhteisvaikutuksen paineprofiili. Kuvasta voidaan havaita, että tuuli vaikuttaa neutraalin painetaso korkeuteen. Neutraali painetaso ei lävistä rakennusta vaakatasossa, koska tuulen vaikutus eri puolilla rakennusta paine-eroihin on lähes käänteinen. Suojanpuoleisella seinällä tuuli heikentää hormivaikutusta rakennuksen alaosassa ja voimistaa paine-eroa ylimmissä kerroksissa, kun tuulenpuoleisella seinällä vaikutus on päinvastainen. Siten saman kerroksen eri huoneistoissa paine-erot ulkoilmaan nähden voivat erota paljonkin toisistaan. Tuulen aiheuttama paine-ero ei kuitenkaan ole kovin pysyvä ilmiö tuulen voimakkuuden ja suunnan vaihtelusta johtuen.



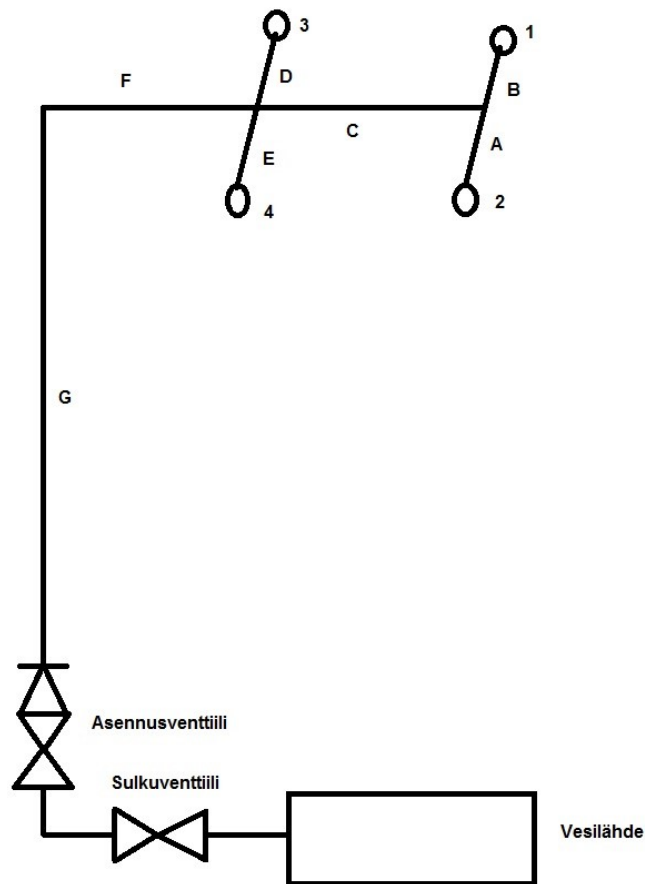
KUVA 18. Hormivaikutuksen ja tuulen yhteisvaikutus

#### 7.4 Sprinklauksen mitoitus esimerkki

Standardin SFS-EN 12845 mukaan asennuksen ylimmän ja alimman sprinklerin välinen korkeusero saa olla enintään 45 metriä ja korkeiden rakennusten sprinklerijärjestelmän on täytettävä OH3-luokan vaatimukset. Siten sprinklerijärjestelmä 80 metriä korkeaan rakennukseen tulee toteuttaa kahdella asennuksella. Esimerkissä on mitoitettu sprinklerijärjestelmän yksi vyöhyke vaikeimman mitoitusalun mukaisesti. Taulukossa 13 on esitetty lähtöarvot laskelmille. Kuvassa 19 on esitetty esimerkkilaskelman periaatepiirros.

TAULUKKO 13. Lähtöarvot sprinklerijärjestelmän mitoitukselle

| Suure | Lukuarvo | Yksikkö | Selite                    |
|-------|----------|---------|---------------------------|
| L     | 3        | m       | Putken ekvivalenttipituus |
| $d_s$ | 27,3     | mm      | Putken sisähalkaisija     |
| C     | 120      |         | Putken laatukerroin       |
| K     | 80       |         | K-kerroin                 |
| P     | 0,5      | bar     | Suuttimen paine           |



KUVA 19. Periaatepiirros esimerkkipöyhäkkeestä

Suuttimen virtaama lasketaan kaavalla 10. Jokaisesta suuttimesta saadaan sama virtaama.

$$Q = 80\sqrt{0,5 \text{ bar}} = 56,6 \frac{l}{min}$$

Virtauksen aiheuttama painehäviö putkessa lasketaan Hazen-Williamsin kaavalla (kaava 11). Ensimmäisenä on laskettu painehäviö putkelle A.

$$p = \frac{6,05 * 10^5}{120^{1,85} (27,3mm)^{4,87}} * 3 \text{ m} * (56,6 \frac{l}{min})^{1,85} = 0,046 \text{ bar}$$

Putkien B, D ja E painehäviöt ovat verkoston symmetrisyyden johdosta samat kuin putkella A. Painehäviöiden laskemisen jälkeen niihin lisätään suuttimista aiheutuvat painehäviöt.

$$0,5 \text{ bar} + 0,046 \text{ bar} = 0,546 \text{ bar}$$

Putken C lävitse kulkee virtaama sprinklereille 1 ja 2, jolloin se on kaksi kertaa niin suuri kuin yhden sprinklerin virtaama ja putken F virtaama on yhtä suuri, kuin kaikkien sprinklerien virtaamat yhteensä (taulukko 14).

*TAULUKKO 14. Putkien C ja F virtaamat ja painehäviöt*

|         | Painehäviö [bar] | Virtaama [l/min] |
|---------|------------------|------------------|
| Putki C | 1,26             | 113,1            |
| Putki F | 2,50             | 226,3            |

Standardin SFS-EN 12845 mukaan asennuksen ylimmän sprinklerin ja mitoitetavana olevan ylimmän sprinklerin välisen hydrostaattisen paine-eron saa lisätä taulukkomitoituspisteen ja sulkuventtiilin väliseen painehäviöön. Tämän eron ollessa esimerkkirakennuksen kaksi kerrostasoa korkeuseroa on 7 metriä (kaava 12).

$$p = 0,098 * 7 \text{ m} = 0,69 \text{ bar}$$

Sprinklerijärjestelmän taulukkomitoitus pisteen ja sulkuventtiilin väliin muodostuu siten 3,2 bar:n kokonaispainehäviö.

## **7.5 Paineistus**

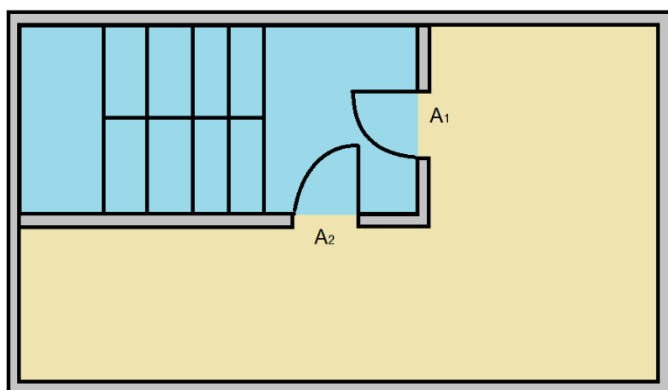
Paloturvallisuusmääräysten mukaan yli 16-kerroksisessa rakennuksessa täytyy olla vähintään kaksi erillistä uloskäytävää, joista yksi on palolta ja savulta suojattu. Muut ovat palolta suojattuja. Savulta suojaaminen voidaan toteuttaa esimerkiksi ylipaineistuksella. Paineistuksen mitoitus perustuu tasapainotilaan rakennukseen tulevien ja rakennuksesta poistuvien ilmavirtojen välillä.

Esimerkkirakennuksessa on porrashuone, jota käytetään poistumistienä. Porrashuoneelle arvioidaan paineistustarve. Taulukossa 15 on esitetty porrashuoneen kerroskohtaiset mitat.

TAULUKKO 15. Porrashuoneen kerroskohtaiset mitat

| Porrashuoneen kerroskohtaiset mitat |    | Yksikkö |
|-------------------------------------|----|---------|
| Korkeus                             | 4  | m       |
| Leveys                              | 8  | m       |
| Pituus                              | 14 | m       |

Paineistuksen mitoituksessa tunnistetaan ensimmäisenä kaikki vuotoilmavirtareitit ja määritetään tehollinen vuotopinta-ala paineistetun tilan ja paineistamattoman tilan välillä (kuva 20). Porrashuoneessa on kaksi rinnakkain olevaa oviaukkoa paineistamattomaan tilaan. Standardissa SFS EN 12101-6 on esitetty rakeneosille vuotokertoimia ja vuotopinta-aloja (liite 1). Taulukossa 16 on esitetty tulokset tehollisen vuotopinta-alan määrittämisestä.



KUVA 20. Pohjapiirros porrashuoneesta

TAULUKKO 16. Tehollinen vuotopinta-ala

| Rakenne  | Korkeus | Leveys | Pituus | Pinta-ala      | Vuotokerroin      | Tehollinen vuotopinta-ala |
|----------|---------|--------|--------|----------------|-------------------|---------------------------|
|          | m       | m      | m      | m <sup>2</sup> | A <sub>L</sub> /A | m <sup>2</sup>            |
| Seinät   | 4       | 8      | 14     | 176            | 0,000014          | 0,002464                  |
| Lattia   |         | 8      | 14     | 112            | 0,000052          | 0,005824                  |
| Ovi A1   |         |        |        |                |                   | 0,01                      |
| Ovi A2   |         |        |        |                |                   | 0,01                      |
| Yhteensä |         |        |        |                |                   | 0,028288                  |

Seuraavaksi selvitetään vuotovirtausten määrä, kun kaikki ovet ovat suljettuina ja paine-ero paineistetun ja paineistamattoman tilan välillä on 50 Pa (kaava 13).

$$Q = 0,83 * 0,028 * (50 \text{ Pa})^{\frac{1}{2}} = 0,166 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Vuotoilmavirroissa otetaan huomioon varmuuskertoimella tuntemattomista vuotoilmareiteistä virtaava ilma.

$$1,5 * 0,166 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0,249 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Laskettu vuotoilmamäärä on kerroskohtainen. Siten kokonaisvuotoilmamäärä koko rakennuksen korkeudella on 5,7 m<sup>3</sup>/s. Seuraavaksi arvioidaan avoimista ovista virtaava ilmamäärä. Oletuksena kaksi porrashuoneeseen johtavaa ovea on auki. Taulukossa 17 on esitetty avoimista ovista virtaava vuotoilmamäärä, joka on virtausnopeuden ja tehollisen vuotopinta-alan tulo.

*TAULUKKO 17. Avoimien ovien kautta virtaava ilmamäärä*

| Suure           | Lukuarvo | Yksikkö           | Selite                          |
|-----------------|----------|-------------------|---------------------------------|
| A <sub>1</sub>  | 2,07     | m <sup>2</sup>    | Oven pinta-ala                  |
| A <sub>2</sub>  | 2,07     | m <sup>2</sup>    | Oven pinta-ala                  |
| A <sub>e</sub>  | 4,14     | m <sup>2</sup>    | Tehollinen vuotopinta-ala       |
| v               | 0,75     | m/s               | Virtausnopeus                   |
| Q <sub>DO</sub> | 3,10     | m <sup>3</sup> /s | Vuotoilmamäärä avoimista ovista |

Kokonaisilmamäärätarve ovien ollessa auki on avoimista ovista vuotavan ilmavirran ja vuotoaukoista virtaavan ilmavirran summa. Kokonaisilmamäärätarve on silloin 8,83 m<sup>3</sup>/s.

Oven avaukseen tarvittava voima saa olla korkeintaan 100 N. Paine-ero aiheuttaa oveen voiman, joka vaikeuttaa oven avaamista. Kaavalla 14 saadaan laskettua maksimipaine-ero, jota ei saa ylittää, jotta oven avaaminen ei vaadi yli 100 N:n voimaa. Ilman paine-eroa oven avaaminen vaatii 30 N voiman.

$$P_{max} = \frac{2 (100 \text{ N} - 30 \text{ N})(0,99 \text{ m} - 0,1 \text{ m})}{2,07 \text{ m}^2 * 0,1 \text{ m}} = 60,8 \text{ Pa} > 50 \text{ Pa}$$

## 8 YHTEENVETO

Tavoitteena oli selvittää korkean rakennuksen LVI-suunnittelun ja paloturvallisuuden erityisvaatimuksia sekä korkeaan rakentamiseen liittyviä määräyksiä. Työtä tehtäessä tuli esille, että lainsäädännöissä tai määräyksissä ei ole erityisesti huomioitu korkean rakentamisen erityispiirteitä. Suunnittelua ohjaavat samat Ympäristöministeriön asetus rakennusten vesi- ja viemärlaitteistoista 1047/2017, Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017 ja Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017 kuten muitakin rakennuksia. Poikkeuksena on Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta 848/2017, jossa on esitetty vaatimukset perustuen rakennuksen korkeuteen.

Korkean rakennuksen korkeus hidastaa rakennuksen evakuointia palotilanteessa, koska poistumismatkat ovat pitkiä. Siitä syystä palotilanteessa koko rakennuksen evakuointi voi olla hyvin haasteellista, joten sprinklerijärjestelmällä, savunhallintajärjestelmällä ja palo-osastoinnilla pyritään suojaamaan rakennuksessa olevia ihmisiä mahdollisimman pitkään.

Korkeus aiheuttaa haasteita putkistosuunnittelussa. Korkeuden kasvaessa nousuputkissa myös paine kasvaa. Paineen hallitsemiseksi rakennus jaetaan vyöhykkeisiin, mikä lisää lämmönsiirtimien, paineenalennusventtiilien, paineenkorotusosiemien, kiertovesipumppujen ja ilmanvaihtokoneiden lukumääriä ja tekniikatiloja, joihin laitteet saadaan sijoitettua.

Hormivaikutus ja tuuli on otettava huomioon ilmanvaihdon suunnittelussa. Ulkoilman lämpötila ja tuulen voimakkuus ja suunta vaikuttavat paineolosuhteisiin rakennuksen sisällä. Ilmanvaihdon suunnittelussa hormivaikutus ja tuuli voidaan ottaa huomioon suunnittelemalla rakennus hieman ylipaineiseksi ja rakentamalla rakennuksen ulkovaippa riittävän tiiviiksi.

Laskentaesimerkeillä saatiin suuntaa antavia tuloksia korkean rakennuksen vaikutuksista lämmitys-, käyttövesi- ja ilmanvaihto-, sprinkleri- ja savunhallintajärjes-

telmiin. Laskentaesimerkit olivat yksinkertaistettuja, ja voidaan todeta, että tarkempi tarkastelu vaatii aina mallinnuksen tai simuloinnin siihen soveltuvalla ohjelmistolla.

## LÄHTEET

1. Aatsalo, Johanna 2018. Maakunnissa ja kasvukeskuksissa vireillä yli kymmenen korkean rakentamisen hanketta. Rakennuslehti 12.2.2018. Saatavissa: <https://www.rakennuslehti.fi/2018/02/maakunnissa-ja-kasvukeskuksissa-vireilla-yli-kymmenen-korkean-rakentamisen-hanketta/>. Hakupäivä: 16.5.2020.
2. ASHRAE Handbook 2019 HVAC Applications, SI Edition. 2019. Atlanta Georgia: ASHRAE.
3. Finland Buildings. 2020. The Sky Scraper Center. Saatavissa: <http://www.skyscrapercenter.com/country/finland>. Hakupäivä 16.5.2020.
4. Ahti-Virtanen, Jaana 2019. Suomessa korkea on maltillista. Projektiutiset 11/01/2019. Saatavissa: <https://www.projektiutiset.fi/suomessa-korkea-on-maltillista/>. Hakupäivä: 16.5.2020.
5. Oulun kaupunki korkean rakentamisen selvitys. 2014. Oulun kaupunki. Saatavissa: [https://www.ouka.fi/c/document\\_library/get\\_file?uuid=e72d1739-5b80-40bb-959f-b6336dd3595e&groupId=64220](https://www.ouka.fi/c/document_library/get_file?uuid=e72d1739-5b80-40bb-959f-b6336dd3595e&groupId=64220). Hakupäivä: 16.5.2020.
6. Tall, Super Tall and Mega Tall Buildings. 2020. Council on Tall Buildings and Urban Habitat. Saatavissa: <https://www.ctbuh.org/resource/height>. Hakupäivä: 16.5.2020.
7. L 5.2.1999/132. Maankäyttö- ja rakennuslaki.
8. Rakentamismääräyskokoelma. 2016. Ympäristöministeriö. Saatavissa: <https://www.ym.fi/rakentamismaaraykset>. Hakupäivä: 18.5.2020.
9. Mitä standardisointi on. 2020. Suomen standardisoimisliitto. Saatavissa: [https://www.sfs.fi/standardien\\_laadinta/mita\\_standardisointi\\_on](https://www.sfs.fi/standardien_laadinta/mita_standardisointi_on). Hakupäivä 18.5.2020.
10. LVI-kortisto. 2020. Rakennustieto Oy. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/index/tuotteet/lvi.html>. Hakupäivä: 18.5.2020.

11. APEC Building Codes, Regulations and Standards. 2013. APEC. Saatavissa: <http://www.cec.org/islandora-gb/islandora/object/islandora:1213/datstream/OBJ-EN/view>. Hakupäivä: 18.5.2020.
12. BFS 2018:4. 2018. Boverket. Saatavissa: <https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2019/bbr-2011-6-tom-2018-4-english-2.pdf>. Hakupäivä 18.5.2020.
13. 1.3 Codes and Standards. 2019. U.S. General Services Administration. Saatavissa: <https://www.gsa.gov/node/81625>. Hakupäivä: 18.5.2020.
14. Simmonds, Peter 2016. The ASHRAE Design Guide for Tall, Supertall and Megatall Building Systems. REHVA Journal. 10/2016. S. 45–52. Saatavissa: <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/the-ashrae-design-guide-for-tall-supertall-and-megatall-building-systems>. Hakupäivä: 18.5.2020.
15. YM1/601/2015. 2015. Ympäristöministeriön ohje rakentamisen suunnittelu-tehtävien vaativuusluokista. Helsinki: Ympäristöministeriö.
16. YM2/601/2015. 2015. Ympäristöministeriön ohje rakennusten suunnittelijoiden kelpoisuudesta. Helsinki: Ympäristöministeriö.
17. Paloturvallisuussuunnittelija. 2020. Rakennus-, LVI- ja kiinteistöalan henkilö-pätevyudet FISE Oy. Saatavissa: <https://fise.fi/patevyyspalvelu/hae-patevyutta/suunnittelijat/paloturvallisuussuunnittelija/>. Hakupäivä: 18.5.2020.
18. Webster, Wayne 1999. Mechanical and electrical systems in apartments and multi-suite buildings: a practioner's handbook. Canada: Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC).
19. Laasonen, Niina 2018. LVIJ-järjestelmien kustannusoptimointi korkeissa asuinkerrostaloissa. Opinnäytetyö. Helsinki: Metropolia ammattikorkeakoulu, talotekniikan koulutusohjelma. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/152539/Asuintorni\\_LVIJ-optimointi\\_Laasonen.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/152539/Asuintorni_LVIJ-optimointi_Laasonen.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Hakupäivä 10.1.2020.

20. LVI 11-10472. 2011. Paisuntajärjestelmän valinta ja mitoitus. Helsinki: Rakennustietosäätiö RTS.
21. Julkaisu K1/2013. 2014. Energiateollisuus ry. Saatavissa: [https://energia.fi/files/502/JulkaistuK1\\_2013\\_20140509.pdf](https://energia.fi/files/502/JulkaistuK1_2013_20140509.pdf). Hakupäivä 10.1.2020.
22. Avoin paisuntajärjestelmä. 2008. Oulun seudun ammattopisto. Saatavissa: [http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/pientalon\\_lammitys/avoin\\_paisunta.htm](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/pientalon_lammitys/avoin_paisunta.htm). Hakupäivä 18.5.2020.
23. LVI 12-10330. 2001. Putkistojen lämpölaajeneminen. Helsinki: Rakennustietosäätiö RTS.
24. Uponor-kiinteistöviemärintikäsikirja 2015. Uponor. Saatavissa: <https://www.uponor.fi/UponorInternet/DirectDownload?did=6C5A3265AF544571A355C7497E95F494>. Hakupäivä 10.1.2020.
25. LVI 12-10370. 2004. Putkistojen ja kanavien kannakointi. Helsinki: Rakennustietosäätiö RTS.
26. Kurronen, Aki 2019. DI Insinööritoimisto Entalcon Oy. Luento 6.3.2019.
27. 1047/2017. Ympäristöministeriön asetus rakennusten vesi- ja viemärlaitteistoista.
28. Megri, Ahmed Cherif 2011. Teaching High-rise Plumbing Design for Engineers. Saatavissa: <http://www.asee.org/public/conferences/1/papers/2739/download>. Hakupäivä 18.5.2020.
29. Mahmoud, Bassem Mulla 2019. Water Distribution in Tall Buildings. Saatavissa: <http://contractorselection.com/plumbing-in-high-rise-buildings/water-distribution-in-buildings/>. Hakupäivä: 16.5.2020.
30. Talotekniikkateollisuus 2019. Vesi- ja viemärlaitteistot -opas. Talotekniikka info. Saatavissa: <https://www.talotekniikkainfo.fi/rakennusten-vesi-ja-viemarilaitteistot-opas>. Hakupäivä 19.5.2020.

31. D1 (2007). 2007. Kiinteistöjen vesi- ja viemärlaitteistot. Määräykset ja ohjeet 2007. D1 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Liite 2 Vesilaitteiston mitoitussohjeet. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: [https://www.talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/d1\\_2007\\_liite\\_2\\_korjattu\\_kaava\\_1.pdf](https://www.talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/d1_2007_liite_2_korjattu_kaava_1.pdf). Hakupäivä 19.5.2020.
32. Kraut, Peter 2014. High rise water distribution. Saatavissa: <https://www.phcppros.com/articles/1904-high-rise-water-distribution>. Hakupäivä: 16.5.2020.
33. Aher, Ashish – Chinchani, Raturaj – Chopde, Kunal – Bhide, Girish 2016. Control The Flow Of Water in Multi Storey Building. International Journal Of Scientific & Engineering Research. Vol. 7. Issue 7. S. 1482–1486. Saatavissa: <https://www.ijser.org/researchpaper/Control-The-Flow-Of-Water-in-Multi-Storey-Building.pdf>. Hakupäivä: 16.5.2020.
34. Post, Nick 2009. Plumbing design: Sanitary plumbing in high-rise buildings. Plumber's Journal. 10/11. S. 20–21.
35. Steele, Alfred 1975. High rise plumbing design. Los Angeles, Kalifornia: Miramar Publishing Company.
36. 901.2 Vents Required From the 2015 UPC Illustrated training manual. 2015. International Association of Plumbing and Mechanical Officials. Saatavissa: [http://forms.iapmo.org/email\\_marketing/codespotlight/2017/July20.htm](http://forms.iapmo.org/email_marketing/codespotlight/2017/July20.htm). Hakupäivä 19.5.2020.
37. 1009/2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta.
38. O'Brien, Sean – Cammalleri, Vince 2013. Stack Effect and Mechanical Exhaust System Impacts on Building Pressures and Envelope Air Leakage. Saatavissa: <https://www.aivc.org/sites/default/files/7-2%20a.pdf>. Hakupäivä 18.5.2020.
39. Sandberg, Esa 2016. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät, Ilmastointiteknikka osa 1. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy.

40. Virta, Jari – Pylysy, Petri 2011. Taloyhtiön energiakirja. Helsinki: Kiinteistöalan Kustannus Oy. Saatavissa: [https://issuu.com/mediat/docs/taloyhtion\\_energiakirja/](https://issuu.com/mediat/docs/taloyhtion_energiakirja/). Hakupäivä: 16.5.2020.
41. FläktGroup Finland Oy. 2020. Asuntoilmanvaihdon ratkaisut. Saatavissa: <http://resources.flaktwoods.com/Perfion/File.aspx?id=8a24fe53-2a7f-4b51-8c5e-c9b84247ce6c>. Hakupäivä 23.5.2020.
42. Vallox. 2020. Asuntokohtainen ilmanvaihto uuteen kerrostaloon. Saatavissa: [https://www.vallox.com/tietoa\\_ilmanvaihdosta/asuntokohtainen\\_ilmanvaihto\\_uuteen\\_kerrostaloon.html](https://www.vallox.com/tietoa_ilmanvaihdosta/asuntokohtainen_ilmanvaihto_uuteen_kerrostaloon.html). Hakupäivä: 16.5.2020
43. Sisäilmayhdistys. 2020. Ilmavirtaukset rakennuksessa. Saatavissa: <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekninen-toiminta/Ilmavirtaukset-rakennuksessa>. Hakupäivä: 16.5.2020.
44. Efficiency Matrix. 2020. Building Performance. Saatavissa: <https://efficiency-matrix.com/building-performance/>. Hakupäivä: 16.5.2020.
45. Tuulisuus Suomessa. 2020. Tuuliatlas. Saatavissa: <http://www.tuuliatlas.fi/tuulisuus/>. Hakupäivä 16.5.2020.
46. ASHRAE Handbook 2017 Fundamentals, SI Edition. 2017. Atlanta Georgia: ASHRAE.
47. Ranta-aho, Ilari 2016. Hormivaikutuksen aiheuttamien painesuhteiden ja ilmavirtojen hallinta korkeissa rakennuksissa. Diplomityö. Espoo: Aalto-yliopisto.
48. Lampinen, Markku 2008. Kostean ilman termodynamiikka, tilapiirrokset ja reaalikaasut. Otaniemi: Teknillinen korkeakoulu, sovellettu termodynamiikka.
49. Jae-Hun, Jo – Ho-Tae, Seok – Myoung-Souk, Yeo – Kwang-Woo, Kim 2009. Simplified Prediction Method of Stack-Induced Pressure Distribution in High-rise Residential Buildings. Journal of Asian Architecture and Building Engineering. Vol. 8. S. 283-290.

50. Hannuniemi, Petri 2019. Kiwa Inspecta Oy. Luento 3.4.2019.
51. 848/2017. Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta.
52. Paloturvallinen puutalo - Asuin- ja toimitilarakentaminen. 2018. Helsinki: Puuinfo Oy. Saatavissa: <https://www.puuinfo.fi/paloturvallinen-puutalo-asuin-ja-toimitilarakentaminen>. Hakupäivä: 16.5.2020.
53. SFS 5980 Asuntosprinklauslaitteistot. Osa 1: Suunnittelu, asentaminen ja huolto (Insta 900-1:2009). 2010. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
54. SFS-EN 12845:2015 + A1:2019 Kiinteät palonsammutusjärjestelmät. Automaattiset sprinklerilaitteistot: Suunnittelu, asennus ja huolto. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
55. Fishlock, Mark 2013. Wet Risers High-Rise Fire Fighting. Saatavissa: <http://www.highrisefirefighting.co.uk/wr.html>. Hakupäivä: 24.5.2020.
56. RTS 19:58. 2019. Rakennusten savunhallinta ja savunpoistolaitteistojen kunnossapito, ohje-ehdotus. Helsinki: Rakennustietosäätiö RTS.
57. RIL 232-2012 Rakennusten savunpoisto – suunnittelu, toteutus ja ylläpito. 2012. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
58. Cooper, Leonard 2002. Smoke and heat venting. Teoksessa: Dinunno, Philip, ym. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Boston: National Fire Protection Association.
59. Carline, 2020, Smoke removal – smoke ventilation. Saatavissa: <https://carline.com.pl/en/offer-for-business/smoke-removal-smoke-ventilation/>. Hakupäivä: 24.5.2020.
60. McGuire, J. H. – Tamura, G. T. 1971. Smoke control in high-rise buildings. Saatavissa: <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/accepted/?id=4eb36c33-4ac8-4039-a0c7-4268c531adfb>. Hakupäivä: 16.5.2020.

61. Milke, James 2016. Smoke control by mechanical exhaust or natural venting. Teoksessa: Hurley, M. J., ym. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. New York: Springer.
62. Typical Smoke Control System Solution. 2020. Vents. Saatavissa: <http://old.ventilation-system.com/cat/typical-smoke-control-system-solution/>. Hakupäivä: 24.5.2020.
63. SFS-EN 12101-6 + AC 2005 Smoke and heat control systems. Part 6: Specification for pressure differential systems. Kits. Helsinki: Suomen Standardisointiliitto.
64. Wittasek, Nathan 2019. Common smoke control approaches in high-rise buildings. Saatavissa: <https://www.csemag.com/articles/common-smoke-control-approaches-in-high-rise-buildings/>. Hakupäivä: 16.5.2020.

| Rakenneososa                       | Lattian tiiviys | Vuotoalakerroin       |
|------------------------------------|-----------------|-----------------------|
| Lattia                             | keskiverto      | $0,52 \times 10^{-4}$ |
| Ulkoseinät                         | tiivis          | $0,7 \times 10^{-4}$  |
|                                    | keskiverto      | $0,21 \times 10^{-3}$ |
|                                    | harva           | $0,42 \times 10^{-3}$ |
|                                    | erittäin harva  | $0,13 \times 10^{-2}$ |
| Sisäseinät ja porrashuoneen seinät | tiivis          | $0,14 \times 10^{-4}$ |
|                                    | keskiverto      | $0,11 \times 10^{-3}$ |
|                                    | harva           | $0,35 \times 10^{-3}$ |
| Hissikuilun seinät                 | tiivis          | $0,18 \times 10^{-3}$ |
|                                    | keskiverto      | $0,84 \times 10^{-3}$ |
|                                    | harva           | $0,18 \times 10^{-2}$ |

| Ovityyppi  | Vuotopinta-ala [m <sup>2</sup> ] |
|--|----------------------------------|
| Yksilehtinen paineistettuun tilaan avautuva ovi        | 0,01                             |
| Yksilehtinen paineistetun tilan suunnasta avautuva ovi | 0,02                             |
| Kaksilehtinen ovi                                      | 0,03                             |
| Hissin ovi   | 0,06                             |