

Opinnäytetyö

Insinööri (AMK), rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

2023

Meri Mustajärvi

Betonirunkoisten rakennusten sisäilmaongelmat

TURKU AMK 
TURKU UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES

Opinnäytetyö AMK | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri

2023 | 68 sivua

Meri Mustajärvi

Betonirunkoisten rakennusten sisäilmaongelmat

Opinnäytetyössä tarkastellaan betonirunkoisten rakennusten sisäilmaan vaikuttavia tekijöitä rakenteellisesta näkökulmasta. Työ keskittyy erityisesti betonirunkoisten koulurakennusten sisäilmaongelmiin. Työn tavoitteena on saada selkeyttä sisäilmaongelmallisen rakennuksen korjaussuunnitteluun. Työssä selvitetään, mitä epäpuhtauksia sisäilmassa on, sekä miten niitä havaitaan ja tutkitaan. Korjaussuunnittelua lähdetään toteuttamaan lähtötietojen, sisäilmatutkimusten ja jonkinlaisen laajuusrajausten avulla.

Työ toteutettiin teoreettisena tutkimuksena, jossa tutustuttiin tehtyihin tutkimuksiin, olemassa oleviin säädöksiin, ohjeisiin ja lakeihin sekä vanhoihin rakentamiseen liittyviin julkaisuihin. Betonia on käytetty 1960-luvulta asti yleisesti rakennusten runkorakenteena, joten opinnäytetyön voidaan katsoa käsittelevän betonirunkoisia rakennuksia kyseisestä ajanjaksosta tämän päivän rakennuksiin asti.

Betonirunkoisissa koulurakennuksissa sisäilmaongelmia aiheuttavat eniten mikrobit, VOC-yhdisteet sekä hiukkaset, pöly ja kuidut. Myös formaldehydi ja styreeni voivat olla sisäilmaongelman aiheuttajia tai osatekijöitä. Vanhemmissa rakennuksissa taas saatetaan kärsiä PAH-yhdisteiden haitoista. Se, mikä epäpuhtaus ja mistä rakenteesta tai materiaalista se on peräisin, on asiantuntijan ja/tai suunnittelijan yksi keskeisimmistä haasteista. Puhtaan ja terveellisen sisäilman korjaussuunnittelu vaatii laajasti tietoa ja osaamista, jotta korjaukset toteutetaan oikeasta paikasta oikeilla menetelmillä.

Avainsanat:

sisäilmaongelma, betonirunko, koulurakennus

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Bachelor of Civil Engineering

2023 | 68 pages

Meri Mustajärvi

Indoor air problems of concrete-frame buildings

This thesis examines the affecting factors to the indoor air of concrete frame buildings from a structural point of view. Of all concrete frame buildings, the thesis focuses especially on indoor air problems in school buildings. The goal of the thesis is achieving clarity for the repair planning of buildings with indoor air problems. The thesis examines what pollutants are in the indoor air, as well as how they can be noticed and investigated. The repair planning is carried out by means of initial data, indoor air inspection and by limiting the scope.

The thesis was carried out as a theoretical study, which examined other research, existing statutes, directives, and laws, as well as old concrete-related publications. Since the 1960s concrete has been the most popular material for frame systems of school buildings, so the thesis deals with concrete-framed buildings from that period to this day.

In concrete-frame school buildings indoor air problems are caused mostly by microbes, volatile organic compounds (VOC) and particles, dust and fibers. Formaldehyde and styrene can also be causes or components of indoor air problems. Older buildings may suffer from the effects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH). One of the most important challenges for an expert and/or designer is which pollutant and from which structure or material causes the problems. Repair planning for clean and healthy indoor air requires extensive knowledge and expertise, so that the repairs are carried out from the right place and with the right methods.

Keywords: indoor air problem, concrete-frame, school building

Sisältö

| | |
|---|-----------|
| Käytetyt lyhenteet ja sanasto | 7 |
| 1 Johdanto | 8 |
| 2 Sisäilma ja sen ongelmat | 9 |
| 2.1 Sisäilma, sisäilmasto ja sisäympäristö | 9 |
| 2.2 Sisäilmaan vaikuttavat tekijät | 10 |
| 2.2.1 Ihminen | 11 |
| 2.2.2 LVI-tekniikka | 12 |
| 2.2.3 Rakenne | 13 |
| 2.3 Rakennuksen kosteusrasitus | 20 |
| 2.3.1 Kosteuden siirtymistavat | 23 |
| 2.3.2 Kosteuden minimointi rakenteissa | 25 |
| 3 Sisäilmatutkimukset | 26 |
| 3.1 Sisäilman tutkimusmenetelmät | 26 |
| 3.1.1 Ilmanäytteet | 27 |
| 3.1.2 Pintanäytteet | 28 |
| 3.1.3 Materiaalinäytteet | 29 |
| 3.2 Sisäilmatutkimuksia tukevat muut tutkimukset | 30 |
| 3.2.1 Merkkiainekoe | 30 |
| 3.2.2 Paine-eromittaus | 30 |
| 3.2.3 Olosuhdemittaus | 30 |
| 3.2.4 Rakenneavaus | 31 |
| 3.2.5 Kosteusmittaus | 31 |
| 3.2.6 Lämpökuvaukset | 33 |
| 4 Sisäilmakorjauksen suunnittelun taustatiedot | 34 |
| 4.1 Suomalaisten koulurakennusten historia | 34 |
| 4.1.1 1880–1910-luvun massiivitiilirakennukset | 35 |
| 4.1.2 1880–1920-lukujen hirsirakennukset | 35 |

| | |
|--|-----------|
| 4.1.3 1920–1930-lukujen massiivitiilirakennukset | 35 |
| 4.1.4 1950–1960-lukujen tiilverhoillut betonirakennukset | 36 |
| 4.1.5 1970–1980-lukujen elementtirakennukset | 36 |
| 4.1.6 1990–nykyaika hybridirakennukset | 37 |
| 4.2 Betonirunkoiset rakennukset | 37 |
| 4.2.1 Betoniset runkojärjestelmät | 38 |
| 4.2.2 Betonirunkoisen rakennuksen tyypillinen ulkoseinärakenne | 40 |
| 4.2.3 Betonirunkoisen rakennuksen tyypilliset kellarinseinärakenteet | 41 |
| 4.2.4 Betonirunkoisen rakennuksen tyypilliset alapohjarakenteet | 42 |
| 4.3 Betonirunkoisten rakennusten riskit ja ongelmat | 44 |
| 4.3.1 Todennäköisimmät aiheuttajat | 44 |
| 4.3.2 Epätodennäköisimmät aiheuttajat | 46 |
| 4.4 Suunnittelun lähtökohdat | 47 |
| 5 Esimerkki: Sisäilmaongelmainen koulurakennus | 49 |
| 5.1 Lähtötiedot | 49 |
| 5.2 Taustatietojen ja lähtötietojen vertailu | 49 |
| 5.3 Tutkimukset | 53 |
| 5.3.1 Sisäilmatutkimus | 53 |
| 5.3.2 Seurantatutkimus 1 | 55 |
| 5.3.3 Seurantatutkimus 2 | 55 |
| 5.3.4 Ilmanvaihtojärjestelmän kuntotutkimus | 57 |
| 5.4 Korjauskohdat | 58 |
| 6 Yhteenveto | 61 |
| Lähteet | 62 |

Liitteet

Liite 1. Sisäilman tutkimustapoja

Liite 2. Rakenteelliset kosteusriskit ja -ongelmat

Liite 3. Muut rakenteelliset riskit ja ongelmat

Kuvat

| | |
|---|----|
| Kuva 1. Sisäympäristöön vaikuttavat tekijät. | 10 |
| Kuva 2. Ihmisen toiminnasta aiheutuvat sisäilman haittatekijät. | 11 |
| Kuva 3. Rakenteellisista tekijöistä ja rakenneratkaisuista aiheutuvia sisäilman haittatekijöitä. | 14 |
| Kuva 4. Kivihiilitervapohjaisia tuotteita valmistetaan kaksivaiheisen tislauksen avulla kivihiilijauheesta. | 16 |
| Kuva 5. Homeutumisherkkyyssuokat suomalaisen homemallin mukaisesti. | 20 |
| Kuva 6. Kosteusvaurioitumisen yleisperiaate. | 21 |
| Kuva 7. Rakennuksen kosteuslähteitä. | 23 |
| Kuva 8. Pilari-palkkirunkojärjestelmä. | 38 |
| Kuva 9. Pilari-laattarunkojärjestelmä. | 39 |
| Kuva 10. Seinä-laattarunkojärjestelmä. | 39 |
| Kuva 11. Tyypillinen betonirunkoisen rakennuksen ulkoseinärakenne. | 41 |
| Kuva 12. Tyypilliset betonirunkoisten rakennusten kellarinseinärakenteet. Oikeanpuoleinen ratkaisu ei ole rakennusfysikaalisesti yhtä toimiva kuin vasemmanpuoleinen, mutta kyseistä rakennetta on käytetty aikaisemmin kellarinseinärakenteissa. | 42 |
| Kuva 13. Tyypilliset betonirunkoisten rakennusten alapohjarakenteet. | 43 |
| Kuva 14. Esimerkkikohteen perustus-, alapohja- ja ulkoseinärakenne. | 50 |
| Kuva 15. Esimerkkikohteen kellarinseinä. | 51 |
| Kuva 16. Esimerkkikohteen räystäsrakenne. | 52 |
| Kuva 17. Esimerkkikohteen alapohjarakenteessa kapillaarikatkoksi on esitetty tiivistetty sorakerros. | 54 |
| Kuva 18. Esimerkkikohteen väliseinärakenne, joka on osittain maanpaineseinä. | 57 |
| Kuva 19. Harmaalla pohjalla on esitetty alueet, joissa mikrobikasvusto ei ole sallittu. Mikrobikasvusto on kuitenkin siinä kohtaa hyväksyttävää, jos epäpuhtaudet eivät pääse eristeistä sisäilmaan. | 59 |

Käytetyt lyhenteet ja sanasto

| | |
|--------------|--|
| alapohja | rakennuksen alimman kerroksen ja maan välissä oleva vaakarakenne, arkikielessä lattia |
| betonirunko | perustusten yläpuolelle jäävä kuormia kantava ja rakennusta jäykistävä kokonaisuus; rakennus voi olla rungoltaan myös puinen, teräksinen tai sekarunkoinen |
| diffuusio | kosteuden liikkumistapa, jossa kosteus liikkuu osapaine-erojen vaikutuksesta |
| elementti | rakennusosa, joka on valmistettu osittain tai kokonaisuudessaan tehtaalla |
| EPS | polystyreenimuovieriste, arkikielessä styrox |
| konvektio | kosteuden liikkumistapa, jossa kosteus liikkuu ilmavirtojen mukana |
| PAH | polysykliset aromaattisen hiilivedyt ovat ihmisille haitallisia yhdisteitä |
| PCB | polyklooratut bifenyylit ovat ihmisille haitallisia yhdisteitä |
| ryömintätila | tuulettuvissa alapohjarakenteissa alapohjan ja maakerroksen väliin jäävä ilmatila |
| VOC | haihtuvat orgaaniset yhdisteet ovat ihmisille haitallisia yhdisteitä |
| välipohja | rakennuksen eri kerrosten välissä oleva vaakarakenne, arkikielessä katto/lattia |
| yläpohja | rakennuksen ylimmän kerroksen ja vesikaton välissä oleva rakenne, arkikielessä katto |

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on havaita ja hahmottaa betonirunkoisten rakennusten rakenteellisia riskitekijöitä sisäilmaongelmien korjaussuunnittelussa. Oleellisena osana korjaussuunnittelua on lähtötietojen ja kuntotutkimusten tulkinta sisäilmaongelman lähteen tai lähteiden selvittämiseksi. Vääränlainen tulkinta sisäilmaongelmiin johtavista syistä voi aiheuttaa sen, että korjaustyö toteutetaan niin, että sisäilmaongelma ei poistu rakennuksesta. Pahimmassa tapauksessa vääränlainen sisäilmakorjaus voi jopa pahentaa tilannetta.

Sisäilma on monen tekijän summa. Mahdollisiin sisäilmaongelmiin havahdutaan usein silloin, kun rakennuksen käyttäjät alkavat oirehtia. Yleisiä oireita ovat esimerkiksi ärsytys-, iho-, väsymys- ja hengitystieoireet, mutta oireisiin vaikuttaa suuresti myös yksilölliset tekijät. Sisäilmaongelmien ja rakennuksen käyttäjien oireiden välinen syyseuraussuhteen todentaminen on kuitenkin hankalaa, sillä oireiden taustalla ei voida automaattisesti olettaa olevan sisäilma. Tämän lisäksi suurin osa ihmisistä viettää aikaa useissa eri rakennuksissa säännöllisesti. Sisäilmaongelman todentaminen vaatii lähtökohtaisesti kunto- ja/tai sisäilmatutkimuksia rakennuksesta.

Betonirunkoisten julkisten ja yksityisten rakennusten, erityisesti koulurakennusten, sisäilmaongelmat ovat ajankohtainen huolenaihe. Sisäilmaongelmista tiedetään nykypäivänä paljon enemmän kuin aikaisemmin, ja tästä syystä niitä ja niiden epäilyjä osataan tuoda myös enemmän esille. Opinnäytetyön lopussa tarkastellaankin varsinaissuomalaista 1980-luvulla rakennettua koulurakennusta, jossa on todettu olevan sisäilmaongelma. Tarkastelussa paneudutaan kohteen lähtötietoihin sekä tehtyihin tutkimuksiin. Opinnäytetyössä kohteelle ei tehdä varsinaista korjaussuunnitelmaa, mutta nimetään ne ongelmalliset rakenneosat, joita olisi suositeltava lähteä korjaamaan sisäilmaongelman poistamiseksi.

2 Sisäilma ja sen ongelmat

Ilma on erilaisten kaasujen seos, joka sisältää noin 3 000 tunnettua alkuainetta ja yhdistettä. Eniten ilmassa on typpeä (78 %) ja happea (21 %). Ilmasta loput 1 % koostuu muista kaasuista, kuten hiilidioksidista. Ilma ei koostu kuitenkaan pelkistä kaasuista, vaan sinne on sekoittunut myös vaihteleva määrä vesihöyryä ja aerosoleja (Karttunen ym. 2008, 68–69.)

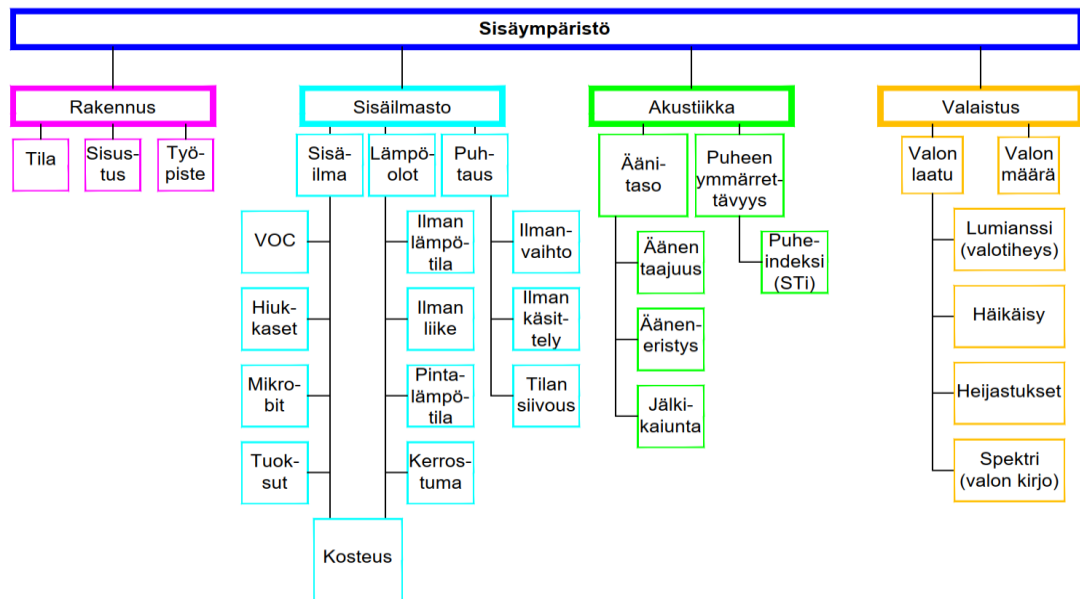
Aerosolit ovat ilman kanssa sekoittuneita pienhiukkasia, joiden koko vaihtelee 0,001–0,1 mm. Ne voivat olla ilmassa kiinteässä tai nestemäisessä muodossa. Aerosolien lukumäärä ja koostumus vaihtelee ajallisesti ja alueittain, mutta ihmisen toiminnalla on tähän suuri vaikutus. Esimerkiksi suurkaupungeissa aerosoleja voi ilmalitraa kohden olla kymmeniä miljoonia, kun taas vastaavasti maapallon syrjäisillä alueilla määrä on joitakin tuhansia. Ilman luonnollisia aerosoleja ovat muun muassa merivedestä muodostuneet suolakiteet, maaperän tomu ja siitepöly. Ihmisen aiheuttamat aerosolit ovat esimerkiksi öljyn ja kivihiilen palamisessa syntyvä noki ja muut hiukkaset, sekä katupöly (Karttunen ym. 2008, 95–96.)

2.1 Sisäilma, sisäilmasto ja sisäympäristö

Sisäilmaan viitataan useilla termeillä, joita ovat sisäilma, -ilmasto ja -ympäristö. Sisäilmalla todellisuudessa tarkoitetaan vain rakenteiden rajaamalla alueella olevaa ilmaa. Sisäilma koostuukin ulkoilman lisäksi esimerkiksi VOC-yhdisteistä, hiukkasista, mikrobeista, tuoksuista ja pölystä (Työterveyslaitos 2023a).

Sisäilmasto on sisäilmaa laajempi käsite (Työterveyslaitos 2023a). Sisäilmasto on kokonaisuus sisäilmasta, lämpöolosuhteista ja puhtaudesta. Lämpöolosuhteilla tarkoitetaan esimerkiksi ilman ja pintojen lämpötilaa. Puhtaudesta puhuttaessa viitataan taas tilojen siisteyteen ja ilman käsittelyyn (Sundberg 2016, 14.)

Sisäympäristö on käsitteistä laajin, ja siihen luokitellaan sisäilmaston lisäksi akustiikka, valaistus sekä rakennuksen sisätilat kuvan 1 mukaisesti (Sundberg 2016, 14). Tässä opinnäytetyössä vain sivutaan sisäympäristöön ja -ilmastoon lukeutuvia tekijöitä. Työn pääpaino on sisäilmaan rakenteellisesti vaikuttavissa epäpuhtauksissa.



Kuva 1. Sisäympäristöön vaikuttavat tekijät (muokattu Sundberg 2016, 14).

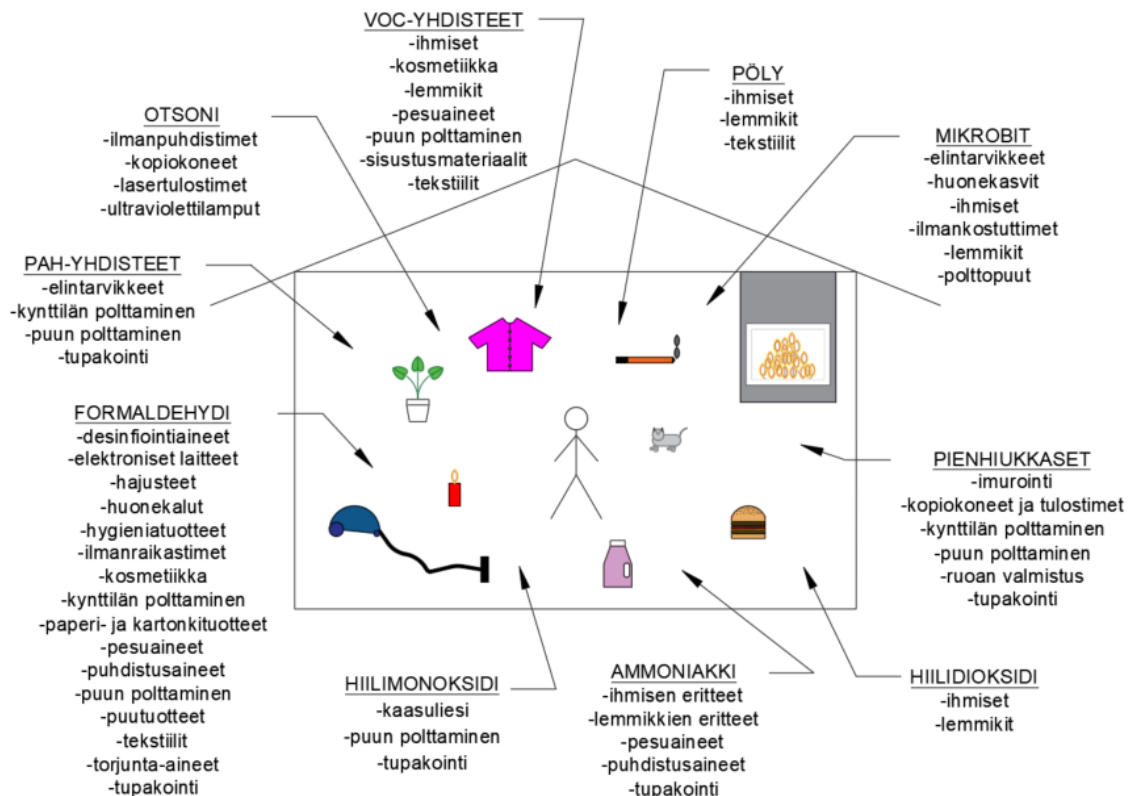
2.2 Sisäilmaan vaikuttavat tekijät

Sisäilmaston laatuun yleisellä tasolla vaikuttavat tekijät ovat rakennuksen ilmanvaihtoratkaisut, sijainti, rakennustapa, rakennusmateriaalit, käyttö ja sääolot. Sisäilmastotekijöitä voidaan jaotella tästä vielä tarkemmin kaasumaisiin yhdisteisiin, hiukkasmaisiin epäpuhtauksiin sekä fysikaalisiin tekijöihin (Sisäilmayhdistys ry 2023i.) Opinnäytetyössä edellä mainitun jaottelun sijaista, on haittatekijät jaoteltu aluksi kolmeen ongelman lähteeseen: ihmisen toimintaan, LVI-tekniikkaan ja rakenteellisiin tekijöihin.

2.2.1 Ihminen

Ihminen voi omalla toiminnallaan vaikuttaa huomattavasti sisäilman laatuun. Jokaisesta rakennuksesta löytyy ainakin yksi, ellei useampi ihmisen aiheuttama epäpuhtaustekijä. Puunpoltto on yksi eniten epäpuhtauksia sisäilmaan aiheuttava lähde. Polttamisesta syntyy VOC-yhdisteitä, pienhiukkasia, PAH-yhdisteitä, formaldehydiä ja hiilimonoksidia. Myös kynttilän polttaminen lisää sisäilman epäpuhtauksia. Ihmiset ja lemmikit tuovat osuuteensa sisäilmaan esimerkiksi mikrobeilla, hiilidioksidilla ja VOC-yhdisteillä (Terveystieteiden tutkimuskeskus 2023b.)

Pölyä syntyy jatkuvasti tekstiileistä, ihmisistä ja lemmikeistä. Rakennuksen säännöllisellä siivouksella ja puhtaanapidolla on merkitystä sisäilman laatuun. Kuvassa 2 on esitetty ihmisen aiheuttamia epäpuhtaustekijöitä ja niiden lähteitä.



Kuva 2. Ihmisen toiminnasta aiheutuvat sisäilman haittatekijät.

Epäpuhtauksia on yksinkertaista ehkäistä säännöllisellä siivouksella ja epäpuhtauslähteiden hallitsemisella. Rakennuksen omistajalla ja/tai käyttäjällä on vastuu siitä, miten laadukkaana sisäilma halutaan omalla päätöksellä tai toiminnalla pitää. Koulurakennuksissa tällaisia laatutekijöitä ovat esimerkiksi siivous, huonekasvit, tekstiilit ja suuri palokuorma. Myös säännöllinen ilmanvaihtojärjestelmän puhdistus on tärkeää laadukkaan ilmanvaihdon ja sisäilman ylläpitämiseksi. Ilmanvaihdosta kerrotaan lisää seuraavassa luvussa.

2.2.2 LVI-tekniikka

LVI- eli lämpö-, vesi- ja ilmanvaihtotekniikalla on omalta osaltaan vaikutusta sisäilman puhtauteen ja terveellisyyteen. Lämpö- ja vesitekniikalla ei ole lähtökohtaisesti suurta vaikutusta sisäilmaan, mikäli kyseiset järjestelmät toimivat moitteettomasti. Epämiellyttävää hajua sisäilmaan voi kuitenkin aiheuttaa esimerkiksi kuivat hajulukot ja viemärit. Putkirikon sattuessa rakenteisiin pääsee kosteutta, josta aiheutuu mahdollisesti kosteus- ja mikrobivaurio, mikäli hajonnutta putkea ei huomata ajoissa. Kosteus- ja mikrobivaurioita käsitellään enemmän luvuissa 2.3.3 ja 2.4.

Myös lämpöolosuhteilla on suuri rooli sisäilman kannalta silloin, kun sisäilman lämpötilaa lasketaan tarkoituksellisesti tai se laskee tahattomasti. Viileämmissä rakenteissa rakenteen kosteuskäyttäytyminen ei enää toimi suunnitellulla tavalla, ja tämä voi johtaa rakenteen kosteus- ja mikrobivaurioon. Tilan lämpötila vaikuttaa myös ihmisen kokemiin tuntemuksiin, kuten vireystilaan. Sisäilman ihanteellinen lämpötila on 20–22 °C.

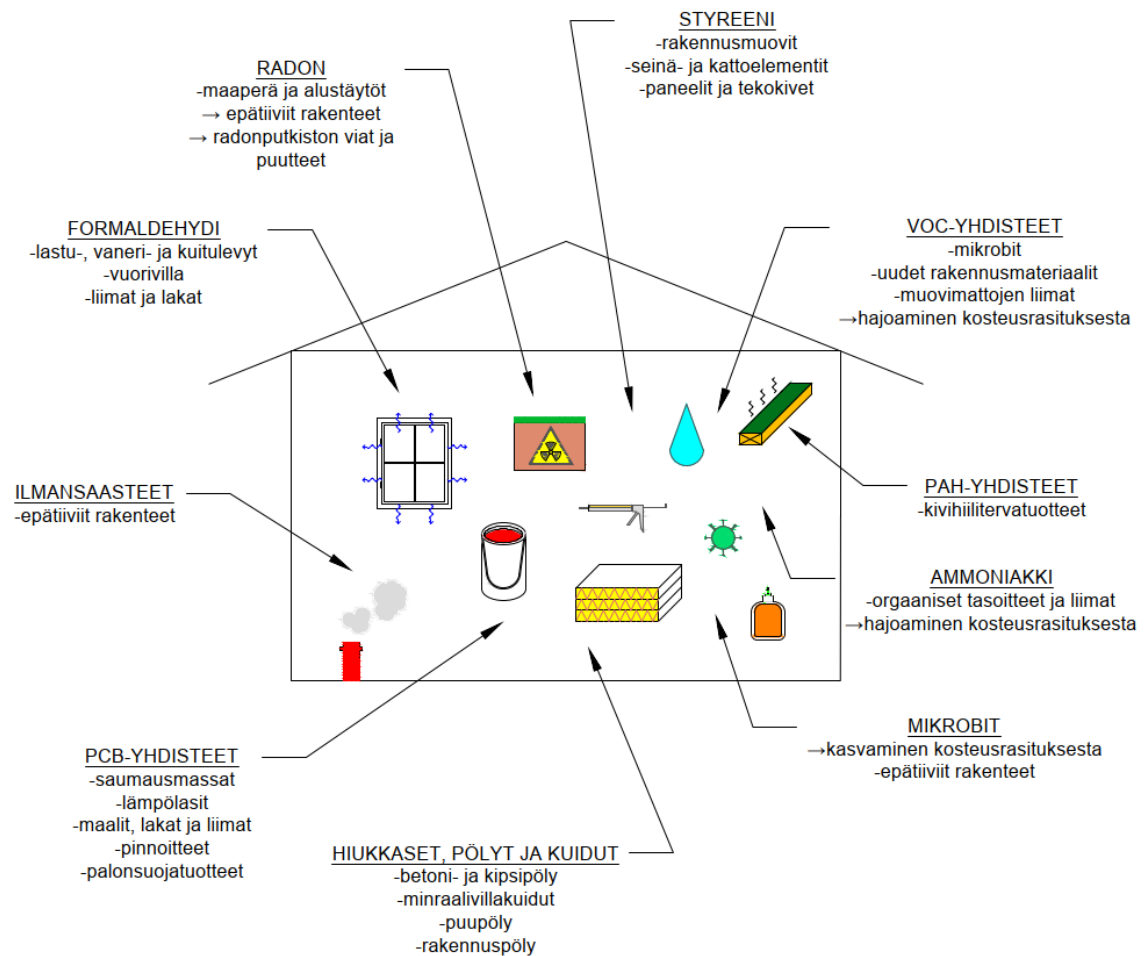
Ilmanvaihtotekniikalla on suuri merkitys sisäilman laatuun. Suomessa on käytössä kolme erilaista ilmanvaihtojärjestelmää: painovoimainen ilmanvaihto, koneellinen poistoilmanvaihto sekä koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto (Hengitysliitto 2023a). Kaikkien edellä mainittujen ilmanvaihtojärjestelmien tarkoituksena on ylläpitää rakennuksen hyvää sisäilmaan tuomalla rakennukseen puhdasta ilmaa ja poistamalla rakennuksesta epäpuhtauksia sisältävää ilmaa

(Hengitysliitto 2023b). Tämän vuoksi onkin tärkeää, että ilmanvaihtojärjestelmä on mitoitettu, asennettu ja säädetty oikein ja rakennukselle sopivaksi.

Ilmanvaihto ei saa kuivattaa tai kosteuttaa sisäilmaa tarpeettoman paljon. Viallinen tai puutteellinen ilmanvaihto voi pahimmillaan tuoda sisäilmaan lisää epäpuhtauksia, esimerkiksi rakenteiden läpi kulkeutuvalla hallitsemattomalla korvausilmalla. Yksi tärkeimpiä ilmanvaihdon tehtäviä on kuljettaa ihmisen muodostama hiilidioksidi ja kosteus pois sisäilmasta.

2.2.3 Rakenne

Sisäilman laatuun vaikuttaa oleellisesti rakennuksen rakenteelliset tekijät ja rakenneratkaisut (kuva 3). Opinnäytetyössä ei käsitellä sen tarkemmin haitta-aineisiin luokiteltavia raskasmetalleja ja asbestia, sillä ehjässä rakenteessa ne eivät ole sisäilmaongelmien aiheuttajia. Raskasmetallien ja asbestin esiintyvyys tulee ottaa huomioon silloin, kun rakenteille tehdään korjaus- tai purkutöitä. Sisäilmaongelmia aiheuttavista epäpuhtauksista kerrotaan lisää seuraavissa luvuissa.



Kuva 3. Rakenteellisista tekijöistä ja rakenneratkaisuista aiheutuvia sisäilman haittatekijöitä.

Ammoniakki

Ammoniakki on väritön kaasu, jolla on tunnusomainen pistävä hajua. Sitä vapautuu tietyistä orgaanisista aineista sisältävistä tasoitteista ja liimoista kosteusrasituksen seurauksena. Ammoniakista aiheutuu hajuhaittaa ja siitä voi seurata ihmiselle ärsytysoireita (Ympäristöopas 2016, 15, 74.)

Formaldehydi

Formaldehydi on väritön, voimakashajuinen ja orgaaninen kaasuyhdiste (Työterveyslaitos 2023b). Sitä käytetään lastu-, vaneri- ja kuitulevyjen sekä vuorivillan, liimojen ja lakkojen valmistukseen (Ympäristöopas 2016, 75). Formaldehydejä vapautuu sitä sisältävistä yhdisteistä sitä enemmän, mitä

lämpimämpi ja kosteampi ilma on (Sisäilmayhdistys ry 2023b). Formaldehydit aiheuttavat ihmiselle hajuhaittaa, ärsytysoireita, kosketusihottumaa ja syöpäriskin kasvua (Ympäristöopas 2016, 15).

Hiukkaset, pöly ja kuidut

Erilaisia hiukkasia, pölyjä ja kuituja vapautuu rakennusmateriaaleista kulutuksen tai rikkoutumisen seurauksena. Esimerkiksi pinnoittamattomat ja rasitetut betonipinnat voivat vapauttaa sisäilmaan betonipölyä. Mineraalivillakuituja sisäilmaan pääsee taas rikkoutuneista lämmön-, äänen- ja paloeristeistä, jotka on tehty mineraalivillasta. Mineraalivillaeristeitä voidaan käyttää myös ilmanvaihtojärjestelmän äänenvaimentimina ja akustiikkalevyinä. Puupölyä voi taas irrota puukuituvillaeristeestä. Asbestikuituja sisäilmaan voi päästä rikkoutuneista asbestipitoisista materiaaleista (Ympäristöopas 2016, 65–66.)

Kiinteistön rakennus- ja korjaustyövaiheessa rakennuspölyä on voinut kertyä ja jäädä paikkoihin, esimerkiksi ilmastointikanaviin tai jalkalistojen taakse, josta se vaikuttaa sisäilmaan pitkällä aikavälillä. Kuituja eristeistä irtoaa niiden vanhetessa ja haurastuessa, mekaanisen rasituksen, ilmavirtausten tai tärinän irrottamana. Hiukkaset, pöly ja kuidut aiheuttavat ihmiselle silmien ja hengitysteiden ärsytysoireita. Betonipöly sisältää kvartsipölyä, joka lisää keuhkosairauksien riskiä ja asbestikuitujen hengittäminen syöpäriskin kasvua ja asbestoosia (Ympäristöopas 2016, 65–66.)

Ilmansaasteet

Ilmansaasteet ovat haitallisia hiukkasmaisia tai kaasumaisia aineita, jotka ovat peräisin luonnosta tai ihmisen toiminnasta. Ilmansaasteiden lähteitä ovat tieliikenne, energiantuotanto, teollisuuslaitokset, puun pienpoltto ja työkoneet (Terveyden ja hyvinvoinnin laitos 2023a.) Ilmansaasteita päätyy sisäilmaan ennen kaikkea ikkunatuuletuksen ja puutteellisen ilmanvaihdon ja sen suodatuksen kautta, mutta myös kulkeutumalla epätiivien rakenteiden läpi (Hengityслиitto 2023c). Ilmansaasteet aiheuttavat nuhaa ja yskää, sekä mahdollisesti myös hengenahdistusta ja rintakipua (Helsingin seudun ympäristöpalvelut 2023).

PAH-yhdisteet

Polysyklisiä aromaattisia hiilivetyjä eli PAH-yhdisteitä esiintyy kivihiilijauheesta valmistetuissa tuotteissa. Kivihiilitervapohjaisissa tuotteissa on satoja orgaanisia yhdisteitä, joista PAH-yhdisteet ovat kaikista haitallisimpia. Kivihiilitervaa syntyy kivihiilen koksauksen sivutuotteena kuvan 4 mukaisesti. Kivihiilitervaa tislaamalla saadaan taas kreosoottiöljyä ja kivihiilipikeä (Airaksinen ym. 2023, 1.) Nämä kaikki kolme tuotetta sisältävät PAH-yhdisteitä, ja niillä on sama ratapölkyn ominaishaju. Kreosoottiöljyn nimitys on oikeaoppisesti myös kreosootti, mutta arkikielessä käsiteellä tarkoitetaan yleensä kaikkia kivihiilitervatuotteita (Yle MOT 2021.)



Kuva 4. Kivihiilitervapohjaisia tuotteita valmistetaan kaksivaiheisen tislauksen avulla kivihiilijauheesta (Airaksinen ym. 2023, 1).

Kivihiilitervatuotteita on käytetty rakennusmateriaaleissa eniten vuosina 1890–1950. Tuotteita on kuitenkin voitu käyttää vuosina 1870–1995 (Asuinrakennukset 2023.) Kivihiilitervaa on käytetty puupalkkien suojaamisessa ja rakennuspahvien-, papereiden ja huopien kyllästeenä. Näitä niin sanotusti tervapapereita- ja pahveja sekä huopia on käytetty useisiin käyttötarkoituksiin, kuten kosteus- ja höyrynsulkuna ala-, ylä- ja välipohjissa sekä seinärakenteissa, kattohuopina ja putkien eristeinä. Kivihiilipikeä on käytetty valettuna tai siveltyinä kosteuden- ja vedeneristeinä muun muassa perustus- ja lattiarakenteissa. Lattiarakenteiden valuasfalttiin on voitu käyttää kivihiilipikeä. Kreosoottiöljyllä on käsitelty ja

kyllästetty puutuotteita, ja sillä kyllästetään Suomessa edelleenkin ratapölkkyjä ja sähköpylväitä (Airaksinen ym. 2023, 3.)

Kivihiilitervatuotteet tunnistaa niiden tummasta väristä ja ratapölkyn hajusta (Asuinrakennukset 2023). PAH-yhdisteet aiheuttavat ärsytysoireita, päänsärkyä, huonovointisuutta ja syöpäriskin kasvua (Airaksinen ym. 2023, 5–6).

PCB-yhdisteet

Polyklooratut bifenyylit eli PCB-yhdisteet ovat teollisesti valmistettuja orgaanisia klooriyhdisteitä. Ulkomuodoltaan ne ovat öljymäisiä, kirkkaita tai kellertäviä ja hajuttomia nesteitä. PCB-yhdisteet kestävät erittäin hyvin kemiallista ja mikrobiologista hajoamista. Ne ovat myös eristäviä ja huonosti syttyviä yhdisteitä (Tuomisto yms. 2011, 4.) Rakentamisessa yhdisteitä on käytetty muun muassa saumausmassoissa, lämpölaseissa, lakoissa, liimoissa, maaleissa, pinnoitteissa, palonsuojatuotteissa ja sähkölaitteissa (Ympäristöopas 2016, 77). PCB-yhdisteitä on käytetty rakentamisessa vuosina 1930–1990 (Komulainen yms. 2011, 99), eniten vuosina 1950–1970 (Asbesti.info 2017). PCB-yhdisteet aiheuttavat pitkällä aikavälillä syöpäriskin kasvua ja heikentävät lisääntymiskykyä. Suomalaiset altistuvat PCB-yhdistelle (ja dioksiineille) pääasiassa kalansyönnin kautta, sillä hyvän kestävyytensä takia, PCB-yhdisteet eivät hajoa, vaan varastoituvat esimerkiksi eliöiden rasvakudoksiin (Duodecim Terveyskirjasto 2023.)

Radon

Radon on hajuton ja näkymätön radioaktiivinen kaasu. Sitä syntyy useiden hajoamisten kautta uraanista, jota taas esiintyy graniittisessa kallio- ja maaperässä (Säteilyturvakeskus 2023a.) Radonia pääsee sisäilmaan maa- ja kallioperästä sekä rakennuksen alustäyttöistä, epätiivien rakennusten lävitse. Radonille voi altistua myös porakaivoveden kautta. Radonia torjutaan rakenteellisesti esimerkiksi rakenteiden tiivistämisellä, ryömintätilan tuuletuksella, hyvällä ilmanvaihdolla ja/tai radonputkistolla (Säteilyturvakeskus 2023b.) Putkistolla radon johdetaan maanvastaisissa rakenteissa rakennuksen vesikatolle pystyputkien kautta. Vesikatolle asennetaan tällöin

huippumurikytkentä. Radon aiheuttaa sisäilmassa keuhkosyövän riskin kasvua (Terveyden ja hyvinvoinnin laitos 2023c).

Styreeni

Styreeni on orgaaninen yhdiste, jolla on pistävä makeahko ominaishaju. Se toimii aineisosana erilaisten kestopuovituotteiden valmistuksessa. Styreeniä käytetään rakennusmuovien, seinä- ja kattoelementtien sekä paneelien ja tekokivien valmistamiseen. Mikäli materiaalien valmistusprosessissa polyesterihartsimuovit eivät olet reagoineet täydellisesti keskenään, voi tuotteesta vapautua myöhemmin sisäilmaan styreeniä. Styreeni on suhteellisen uusi tuote sisäilmaongelmista puhuttaessa. Styreeni aiheuttaa ärsytysoireita, hermoston toiminnan häiriöitä ja syöpäriskin kasvua (Työterveyslaitos 2023c.)

VOC-yhdisteet

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet eli VOC-yhdisteet ovat olomuodoltaan kaasumaisia ja niitä on satoja erilaisia. VOC-yhdisteitä haihtuu sisäilmaan rakennusmateriaalien liuotin- ja raaka-ainejäämistä, sekä valmistusprosessien reaktio- ja hajoamistuotteista. (Hengitysliitto 2023d.) VOC-pitoisuudet ovat koholla etenkin uudiskohteissa ensimmäisen 6 kk:n aikana, mutta tasaantuvat normaalille tasolle ajan kuluessa.

VOC-yhdisteitä voi vapautua sisäilmaan myös materiaalien, kuten liimojen ja tasoitteiden hajoamisen seurauksena. Hajoaminen alkaa tapahtua usein kosteusrasituksen ja/tai alkalisen kosteuden seurauksena. Tyypillinen VOC-yhdisteiden lähde betonirunkoisissa rakennuksissa on betonilattioiden päälle asennettu muovimatto. Tällöin muovimatto on voitu asentaa betonin päälle liian aikaisin, jolloin betonista haihtuva kosteus hajottaa maton liimausta. Betonin alkalisella kosteudella eli korkealla emäksisyydellä on myös hajottava, jopa hajottavampi vaikutus liimoihin ja tasoitteisiin kuin kosteudella (Leivo yms. 2019, 383). VOC-yhdisteet aiheuttavat ärsytysoireita ja astmaa (Ympäristöopas 2016, 15).

Mikrobit

Mikro-organismit eli pieneliöt ovat mikroskooppisen pieniä eliöitä. Mikrobit ja niiden itiöt ovat osa elinympäristöä, ja niitä on kaikkialla. Mikrobeihin kuuluvat bakteerit, levät, alkueläimet, hiivat, homeet ja virukset. Mikrobit eivät itsellään aiheuta rakenteille vaurioita, mutta jos mikrobit pääsevät kasvamaan, voi rakenteeseen syntyä mikrobivaurio (Hometalo.fi 2023).

Mikrobit tarvitsevat kasvaakseen lämpöä, ravinteita ja kosteutta. Ne saavat rakenteista riittävästi lämpöä ja ravinteita kasvuedellytyksilleen. Useimmat homesienet kasvavat lämpötila-alueella +5...35 °C ilman suhteellisen kosteuden ollessa yli 70 %. Mikrobitien ravinnoksi kelpaa lähes kaikki eloperäinen materiaali, kuten puu, pahvi, tapetti tai huonepöly. Näistä kolmesta kasvuedellytyksestä kosteus on se tekijä, jonka pääsyä rakenteisiin ehkäistään ja estetään (Sisäilmäyhdistys ry 2023g.) Rakenteiden kosteusrasitusta käsitellään enemmän luvussa 2.4.

Suomalainen homemalli on pisimmälle maailmassa kehitetty homeen muodostumisen ja homehtumisriskin arviointityökalu. Mallissa eri rakennusmateriaaleille on määritelty niiden herkkyys homehtumiselle neljän homehtumisherkkyysluokan avulla kuvan 5 mukaisesti (Tampereen yliopisto 2023.) Mikrobit ja niiden aineenvaihduntatuotteet pääsevät sisäilmaan vaurioituneista rakenteista useimmiten epätiivien rakenteiden lävitse.

| Homehtumisherkkyyssluokka | | Rakennusmateriaalit |
|---------------------------|--------------------|--|
| HHL1 | Hyvin herkkä | Karkeasahattu ja mitallistettu puutavara (mänty, kuusi ja lehtipuut), höylätty mänty, koivuvaneri, käsittelemätön huokoinen puukuitulevy, kartonkipintainen kipsilevy |
| HHL2 | Herkkä | Höylätty kuusi, paperipohjaiset bitumoidut/käsitellyt tuotteet ja kalvot, puupohjaiset liimatut levyt, havuvaneri, bitumoitu/käsitelty huokoinen kuitulevy |
| HHL3 | Kohtalaisen herkkä | Mineraalivillat, muovipohjaiset materiaalit, kevytbetoni, kevytsorabetoni, karbonatisoitunut vanha betoni, sementtipohjaiset tuotteet, tiilet, kuitusementtilevy, lasikuitupintainen kipsilevy |
| HHL4 | Kestävä | Lasi ja metallit, alkalinen uusi betoni, tehokkaita homesuoja-aineita sisältävät materiaalit |

- Joidenkin yllä olevassa taulukossa esitettyjen materiaalien, kuten esim. erilaisten muovipohjaisten materiaalien ja tiilien kuulumista esitettyyn homehtumisherkkyyssluokkaan ei ole varmistettu kokeiden avulla.
- Jotkut materiaalit voivat kuulua myös kahteen eri homehtumisherkkyyssluokkaan, kuten kevytbetoni, jossa homehtuminen lähtee liikkeelle luokan HHL2 mukaan, mutta homehtuminen jää luokan HHL3 tasolle.

Kuva 5. Homehtumisherkkyyssluokat suomalaisen homemallin mukaisesti (Tampereen yliopisto 2023).

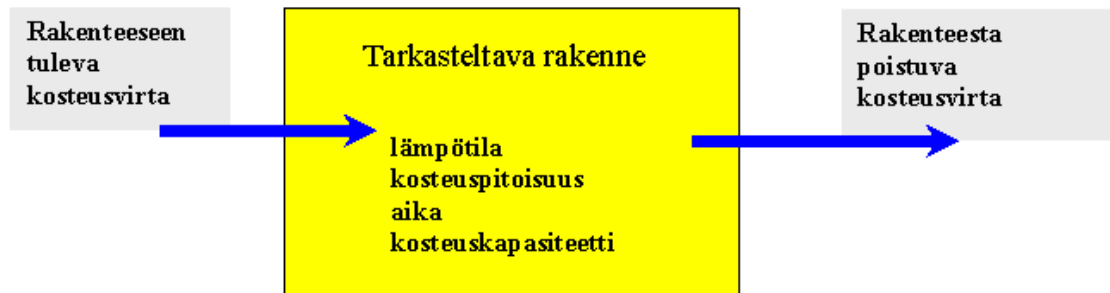
Mikrobit tuottavat aineenvaihduntatuotteinaan haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (MVOC) ja toksiineja. Toksiinit ovat biologisen organismin tuottamia myrkyllisiä aineita. Tällaisia myrkyjä muualla eliömaailmassa ovat muun muassa käämeenmyrky ja punakärpässienten myrky. Mikrobeista leviää sisäilmaan myös hiukkasia, esimerkiksi pinnastaan irronneita mikrobeja, itiöitä ja rihmaston kappaleita (Sisäilmayhdistys ry 2023f.) Mikrobit ja niiden aineenvaihduntatuotteet aiheuttavat hengitystieärsytystä, astmaa, allergisia sairauksia, hengitysinfektioiden lisääntymistä ja yleisoireita (Ympäristöopas 2016, 15).

2.3 Rakennuksen kosteusrasitus

Kosteus on ollut opinnäytetyössä esillä mikrobeja, VOC-yhdisteitä ja ammoniakkia käsittelevissä luvuissa. Rakenteiden kosteusrasituksella on suuri merkitys rakenteisiin ja sisäilmaan, sillä kosteuden seurauksena erilaiset mikrobit alkavat todennäköisimmin kasvaa ja aiheuttaa terveyshaittoja. Kosteusrasituksen seurauksena myös orgaaniset tasoitteet ja liimat alkavat hajota, jolloin sisäilmaan voi päätyä VOC-yhdisteitä ja ammoniakkia.

Rakenteeseen syntyy kosteusvaurio, kun sen kosteuspitoisuus on liian korkea liian kauan. Jokaisella materiaalilla on oma kosteudensitomiskykynsä, ja näin ollen tarkkaa aikamäärettä kosteusvaurion syntymiselle ei voida määrittellä (Sisäilmayhdistys ry 2023g.) Rakennusmateriaalin kostumiseen vaikuttaa suuresti sen hygroskooppisuus. Hygroskooppisella materiaalilla tarkoitetaan sellaista ainetta, jolla on kykyä sitoa itseensä kosteutta ja luovuttaa sitä takaisin ilmaan (Vinha yms. 2013, 18). Kaikki materiaalit pyrkivät tasapainotilaan ympäröivän ilma kanssa, jolloin ilmalla ja materiaalilla on sama kosteuspitoisuus. Kosteustasapainon saavuttaminen vaihtelee materiaalienkohtaisesti ja siihen vaikuttavat kosteuden muutoksen suuruus, lämpötila ja materiaalin koko (Puuinfo 2020). Puun tasapainotilan saavuttamiseen puhutaan yleensä viikoista ja betonin vuosista.

Sisä- ja ulkoilman suhteellisella kosteudella on merkitystä rakenteiden kosteuspitoisuuteen. Suhteellisen kosteuden ollessa sisäilmassa yli 70 %, on mikrobikasvusto mahdollinen (Sisäilmayhdistys ry 2023g). Rakenteiden kosteusvaurioitumisen yleisperiaate on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Kosteusvaurioitumisen yleisperiaate (Sisäilmayhdistys ry 2023e).

Rakennukseen kohdistuu useita kosteuslähteitä koko sen elinkaaren ajan. Kosteus voi päätyä rakenteisiin sisäilmasta, ulkoilmasta tai maasta. Myös rakenne itsessään voi olla kosteuden lähde. Rakenteissa kosteus esiintyy pääsääntöisesti vesihöyrynä ja materiaaliin sitoutuneena kosteutena. Kosteus voi siirtyä rakenteisiin ja rakenteissa useilla eri tavoilla, joita ovat diffuusio, konvektio,

kapillaarinen siirtyminen ja painovoimainen siirtyminen. Kosteus liikkuu rakenteissa kaikilla sen siirtymistavoilla samanaikaisesti (RIL 250-2020, 109.)

Rakennuksen ulkopuolisia kosteuslähteitä ovat muun muassa (RIL 250-2020, 97–98)

- sade, tuulen kuljettama vesi ja lumi
- lumi, jää, sulamisvesi
- pintavesi, valumavesi, hulevesi
- maaperän kosteus (kapillaarinen nousu ja vesihöyry)
- pohjavesi
- ulkoilman vesihöyry.

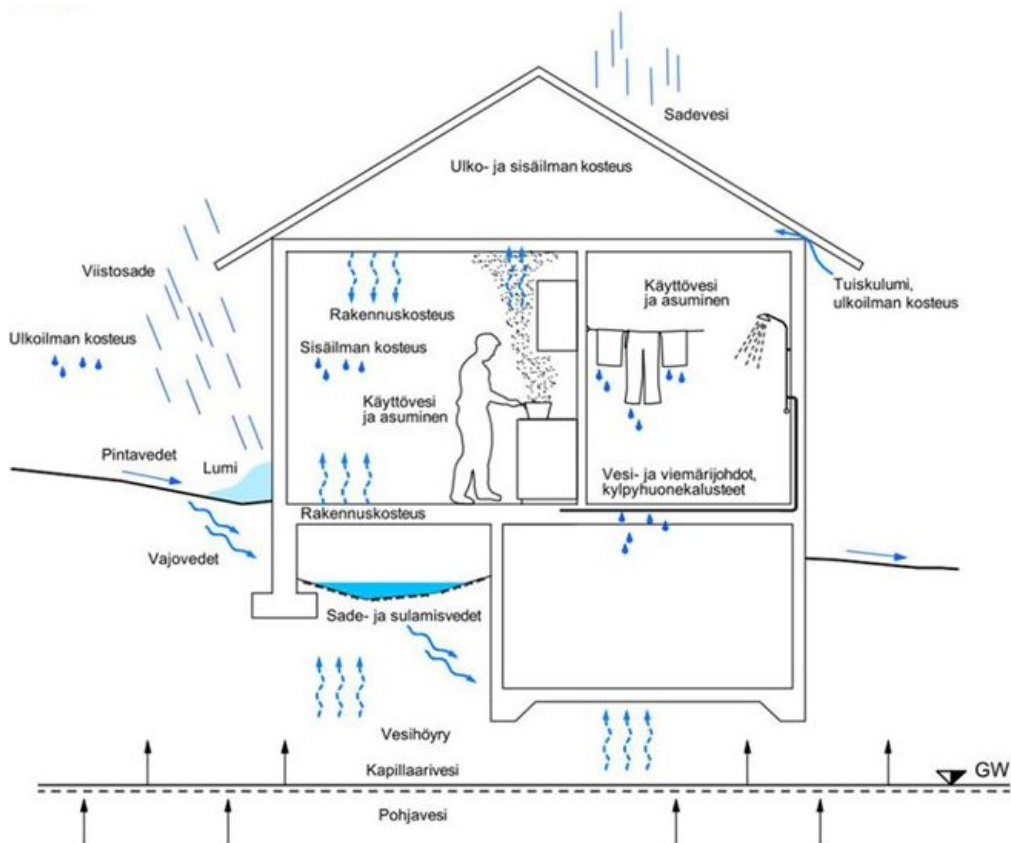
Rakennuksen sisäpuolisia vesihöyryn lähteitä ovat muun muassa (RIL 250-2020, 97–98)

- ihmisten hengitys ja hikoilu
- peseytyminen ja saunominen
- ruoanlaitto ja tiskaaminen
- pyykinpesu ja pyykin kuivaus
- kasvit
- ilmankosteus.

Rakennuksen sisäpuolisia veden lähteitä ovat muun muassa (RIL 250-2020, 97–98)

- pesu- ja roiskevedet märkätiloissa
- mahdolliset putkisto- ja muut vuodot (mahdollinen jäätyminen)
- märkäsiivous
- talotekniset laitteet (pesukoneet)
- rakenteisiin jäänyt ylimääräinen rakennusaikainen kosteus.

Rakennuksen kosteuslähteitä on havainnollistettu kuvassa 7. Oikealaisilla rakenneratkaisuilla pyritään hallitsemaan kosteuden kulkua rakenteista pois.



Kuva 7. Rakennuksen kosteuslähteitä (Rakennuslehti 2017).

2.3.1 Kosteuden siirtymistavat

Diffuusio

Vesihöyryn osapaine-erot rakenteen eri puolilla saa aikaan diffuusion. Tällöin vesihöyrypitoisuudet pyrkivät tasoittumaan tunkeutumalla rakenteen läpi. Vesihöyry kulkeutuu suuremmasta pitoisuudesta pienempään pitoisuuteen. Diffuusion vaikuttaa pitoisuuseron lisäksi materiaalin vesihöyrynläpäisevyys, joka vaihtelee eri materiaaleissa (RIL 250-2020, 107–108.)

Diffuusiota esiintyy molempiin suuntiin, sisäilmasta ulkoilmaa kohti ja ulkoilmasta sisäilmaa kohti. Absoluuttinen kosteus on kuitenkin viileinä vuodenaikoina sisäilmassa usein korkeampi, joten diffuusio tapahtuu tällöin yleensä sisäilmasta rakenteisiin. Kesällä taas kosteus siirtyy diffuusiolla ulkoa rakenteisiin. Diffuusiota

estetään asentamalla rakenteisiin riittävän suuren vesihöyryvastuksen omaavia ainekerroksia oikeisiin kohtiin (RIL 250-2020, 107–108.)

Konvektio

Konvektiota tapahtuu, kun rakenteen eri puolilla on erilaiset ilmanpaineet. Ilmanpaine-eroja aiheuttavat muun muassa tuuli, lämpötilaerot ja ilmanvaihtojärjestelmät. Konvektiossa vesihöyry liikkuu ilmavirtauksien mukana ilman osakaasuna. Vesi taas siirtyy ilmavirtauksien mukana pääosin tuulen paineesta tai muusta ulkoisesta voimasta johtuen (RIL 250-2020, 108.)

Konvektiota tapahtuu rakenteisiin niin sisä- kuin ulkopuoleltakin. Tuuli kuljettaa kosteutta helposti yläpohjarakenteisiin, mikäli rakennedetaljit eivät ole oikein suunniteltu tai toteutettu (RIL 250-2020, 108.) Sisäilman ilmavirtaukset taas voivat kuljettaa kosteutta epätiivien rakenteiden läpi rakenteisiin (Sisäilmayhdistys 2023c). Tästä syystä rakenteet pyritään tekemään ilmatiiviiksi höyryn- tai ilmansululla, jotta lämmin ilma ja sen mukana kulkeva kosteus ei pääse rakenteisiin.

Kapillaarinen siirtyminen

Vesi liikkuu kapillaarisesti materiaalissa pääsääntöisesti veden pintajännitysvoimien aiheuttaman huokospaineen vaikutuksesta. Kapillaarinen siirtyminen voi tapahtua myös toiseen materiaaliin, mikäli materiaalit ovat kosketuksissa toisiinsa. Kapillaarinen siirtyminen voi tapahtua kaikkiin suuntiin, myös ylöspäin (Sisäilmayhdistys ry 2023c.)

Eri materiaaleilla on erilainen kyky siirtää kosteutta kapillaarisesti. Mitä enemmän hienoainesta materiaalissa on, sen suurempi on sen kapillaarisuus. Karkea sepeli toimii esimerkiksi kapillaarisen nousun katkaisevana kerroksena (RIL 250-2020, 108.)

Veden painovoimainen siirtyminen

Painovoiman vaikutuksesta vesi pyrkii siirtymään kohti maata sateena tai valumalla rakenteissa tai maaperässä. Merkittävä osa rakennuksen

kosteusteknisestä toiminnasta perustuu veden painovoimaiseen siirtymiseen (RIL 250-2020, 109.)

2.3.2 Kosteuden minimointi rakenteissa

Kosteuden pääsyä rakenteisiin hallitaan monin keinoin. Alapohja-, ulkoseinä- ja yläpohjarakenteissa kosteuden pääsy pyritään estämään tiiviillä alapohjarakenteella, ulkoverhouksella ja vesikatolla. Kosteus lähtökohtaisesti kuitenkin pääsee rakenteiden sisälle, ja silloin rakenteen on päästävä kuivumaan. Kuivumisen mahdollistavia tekijöitä on esimerkiksi tuulettuvat alapohja ja yläpohja sekä ilmarako ulkoverhouksen ja tuulensuojalevyn välissä. Kosteuden pääsyä rakenteisiin estetään ja ehkäistään myös esimerkiksi salaoja- ja sadevesijärjestelmillä, maanpinnan kallistuksilla ja perustusten vedeneristeellä.

3 Sisäilmatutkimukset

Sisäilmaongelman selvittämiseksi käytetään apuna sisäilmatutkimuksia. Tutkimukset lähtevät liikkeelle lähtötietoihin perehtymisestä, jossa asiantuntija tutustuu kohteen suunnitelmiin ja muihin dokumentteihin. Tämän jälkeen kohteeseen tehdään kohdekäynti ja haastatellaan sen käyttäjiä. Rakennuksessa tehdään aistinvarainen katselmus, jossa kierretään rakennuksen sisä- ja ulkotilat. Aistinvaraisessa katselmuksessa voidaan myös mitata lämpötiloja, ilmavirtauksia ja pintakosteuksia (Ympäristöopas 2016, 10).

Asiantuntija tekee taustatietojen, lähtötietojen ja aistinvaraisen katselmuksen pohjalta alustavan riskiarvion, jossa todetaan mahdolliset sisäilmaan liittyvät ongelmat ja vauriot. Jos tietyn rakenteen kuntoa tai kosteusteknistä toimintaa epäillään, tulee kyseinen rakenne tutkia tarkemmin kuntotutkimusmenetelmin, esimerkiksi rakenneavauksin. Riskiarvioon merkitään myös, pitääkö rakennuksessa tehdä sisäilma-altisteisiin liittyviä tutkimuksia. Tutkimusmenetelmät valitaan kohteen ja sen ongelmien mukaan (Hengitysliitto 2023e.)

3.1 Sisäilman tutkimusmenetelmät

Sisäilman epäpuhtauksia tutkitaan ilma-, pinta- ja materiaalinäyttein. Jokaisessa tutkimustavassa kohteen oireilua aiheuttavista tiloista kerätään näytteitä erilaisin menetelmin. Mittauksista tehdään mittausraportti, josta käy ilmi tilaajan tiedot, mittauksen suorittajan tiedot, mittaustulokset, mittauspaikan kuvaus, mittausajankohta, näytteenotto ja analyysi, mittauskohteesta tehdyt huomiot sekä mittauksen aikana mittaustapahtumaan liittyvät tuloksiin vaikuttavat poikkeamat (RT 14-10775, 2003). Näytteet tutkitaan laboratoriossa. Haitta-aineiden havaitsemisesta, tutkimusmenetelmistä ja toimenpiderajoista on taulukko liitteessä 1.

3.1.1 Ilmanäytteet

Haitta-aineet

Haitta-aineita tutkitaan ilmanäytteillä useilla eri tavoilla. Ilmanäytteet voidaan luokitella aktiivisiin pumpulla kerättäviin näytteisiin ja passiivisiin ilmanäytteisiin.

Aktiivisesti kerättävien näytteiden näytteenottopiste on mahdollisimman keskellä huonetta, noin 1...1,5 m korkeudessa lattiatasosta. Näytteen koko on menetelmäkohtaisesti 5–500 l ilmaa, tyypillisesti noin 100 l. Pumpujen näytteenottonopeudet vaihtelevat 0,1...5 l/min välillä. Näyte kerätään tietynlaiseen putkeen tai keräimeen menetelmäkohtaisesti. Aktiivisesti kerättävissä näytteissä tilan tulee olla tavanomaisessa käytössä ja ilmanvaihdon tulee toimia suunnitellulla tavalla. Luotettavien mittaustulosten saamiseksi ilmanvaihtoa ei saa manipuloida esimerkiksi ikkunoita avaamalla ennen mittautusta tai sen aikana. Aktiivisten mittausten kesto on 0,5...8 h (RT 14-10755, 2003; Työterveyslaitos 2023d.)

Passiivisesti kerättävissä ilmanäytteissä mittauspurkki, -putki tai -keräin jätetään tilaan tietyksi ajanjaksoksi. Radonmittauspurkit on pidettävä tilassa vähintään kaksi kuukautta (Säteilyturvakeskus 2023c). Diffuusiokeräimissä näytteenottoaika vaihtelee yhden vuorokauden ja neljän viikon välillä. Passiivisesti kerättävät näytteet voidaan asettaa esimerkiksi roikkumaan tai tason/pöydän päälle. Näytteenottopisteisiin pätevät samat kriteerit kuin aktiivisiin näytteenottopisteisiin. Diffuusiokeräin voidaan asettaa myös roikkumaan henkilön vaatetukseen rintakehän alueelle, jolloin mittaus toteutetaan hengitysvyöhykemittauksena (Työterveyslaitos 2023d.)

Mikrobit

Ilmanäytteitä mikrobeista voidaan ottaa useilla erilaisilla keräimillä, joista käytetyin on impaktori. Impaktorikeräimiä on 1-, 2- tai 6-vaiheisia. Keräin asetetaan keskelle huonetta 1...1,5 m korkeuteen lattiatasosta. Pumppu pumppaa impaktorin läpi ilmaa 28,3 l/min, 10–15 minuutin ajan (Asumisterveysohje 2003, 80–81.) Mikrobit laskeutuvat impaktorin kammioiden

petrimaljoille kokonsa mukaan. Petrimaljat kerätään impaktorista, suljetaan ja viedään laboratorioon kasvatettavaksi. 7 vuorokauden kuluessa näytteistä tutkitaan homeiden, hiivojen ja bakteerien määrä, sekä niiden lajit ja suvut. 14 vuorokauden jälkeen tutkitaan mahdollisten sädesienten esiintyminen ja määrä (Loopshore 2023a.)

3.1.2 Pintanäytteet

Haitta-aineet

Pintanäytteenottoa hyödynnetään, kun halutaan selvittää sisäilman hiukkas-, pöly- ja kuitupitoisuuksia. Pintanäytteitä otetaan useimmiten geeliteippi- tai pyyhintämenetelmällä.

Geeliteippimenetelmässä näytteenottopiste sijaitsee noin 1,5 m lattiatasosta. Näytteenottopiste on valittava niin, että huoneilman hiukkaset voivat laskeutua alustalle vapaasti. Näytettä kerätään kahden viikon ajan. Geeliteippinäytettä tutkitaan laboratoriossa mikroskooppisilla menetelmillä. Menetelmässä otetaan myös nollanäyte, joka otetaan puhtaalta pinnalta (Työterveyslaitos 2023d.)

Pyyhintämenetelmässä näyte kerätään läpinäkyvään 1 tai 2 litran suljettavaan muovipussiin. Näytteenottopiste puhdistetaan kaksi viikkoa ennen näytteenottoa. Näytteenottopisteen tulee olla sellainen, että hiukkaset voivat vapaasti laskeutua pinnalle. Muovipussi käännetään nurin ja pintoja pyyhitään muovipussilla. Näyte tutkitaan laboratoriossa (Työterveyslaitos 2023d.)

PCB-yhdisteisiin voidaan hyödyntää myös pintanäytteenottoa, jolloin näyte kerätään pumpulipuikolla materiaalin pinnalta.

Mikrobit

Pintanäytteitä voidaan hyödyntää mikrobikasvustojen selvittämisessä. Pintanäyte otetaan vauriokohdasta sekä vertailupinnalta. Mikrobitarkasteluun otettava pintanäyte voidaan ottaa pumpulipuikolla pyyhintämenetelmällä, teippimenetelmällä tai kontaktimaljamenetelmällä. Näyte otetaan 100 x 100 mm:n

suuruiselta alueelta. Näyte toimitetaan laboratorioon (Työterveyslaitos 2023d.) Menetelmäkohtaisesti näyte tutkitaan viljelemällä tai mikroskooppisesti (Ympäristöopas 28, 1997, 26).

3.1.3 Materiaalinäytteet

Haitta-aineet

Ammoniakki, formaldehydi ja VOC-yhdisteiden pitoisuuksien selvittämiseksi käytetään kokonaisemissio- eli bulk-tutkimusta. Samasta materiaalinäytteestä voidaan analysoida kaikki edellä mainittujen haitta-aineiden emissiot. Materiaalinäyte irrotetaan rakenteesta sellaisesta kohdasta, joka parhaiten edustaa tutkittavaa ongelmaa. VOC-yhdisteitä ja ammoniakkia tutkittaessa näytteenottoaika voi toimia esimerkiksi muovimatto. Formaldehydejä tutkittaessa taas lastu- tai kipsilevy. Materiaalinäyte irrotetaan leikkaamalla vähintään 100 x 100 mm alue materiaalista. Näyte toimitetaan laboratorioon (Työterveyslaitos 2023d.)

Materiaalinäytteillä tutkitaan myös PAH- ja PCB-yhdisteiden aikaisempaa käyttöä rakennusmateriaaleissa.

Mikrobit

Mikrobinäyte otetaan epäilystä vauriokohdasta. Tällaisia vauriokohtia voivat olla esimerkiksi betoni, laasti, puu, tapetti, kipsilevy ja lämmöneriste. Näyte otetaan 100 x 100 mm suuruiselta alueelta 10...50 mm paksuudelta (Asumisterveysohje 2003, 80). Materiaalinäyte irrotetaan alustastaan leikkaamalla tai poraamalla. Poraamista tulee kuitenkin välttää, sillä se kuumentaa ja vaurioittaa näytettä. Materiaalinäyte toimitetaan laboratorioon, jossa sen mikrobien määrä, laji ja suku tutkitaan viljelymenetelmällä tai mikroskoopilla (Ympäristöopas 28, 1997, 26).

3.2 Sisäilmatutkimuksia tukevat muut tutkimukset

3.2.1 Merkkiainekoe

Merkkiainekokeella tutkitaan rakennuksen ilmatiiveyttä. Kokeessa rakenteen toiselta puolelta vapautetaan merkkiainekaasua ja toisella puolella rakennetta on kaasun tunnistava mittari. Mitattavan puolen tila alipaineistetaan ilmavirtauksen luomiseksi. Merkkiainekaasu kulkeutuu epätiivissä rakenteessa rakenteen läpi. Ilmavuodot voidaan jakaa kolmeen vuototyyppiin: pistemäinen, vähäinen ja merkittävä ilmavuoto (RT 14-11197, 2015.)

Merkkiainekokeilla voidaan tarkastella ala-, väli-, yläpohjien sekä ulko- ja väliseinien ilmatiiveyttä. Mikäli rakenteissa ilmenee vuotokohtia, rakenteille tehdään usein tiiveyskorjaukset. Rakenteiden sisällä mahdollisesti esiintyvä epäpuhtauksia merkkiainekoe ei havaitse.

3.2.2 Paine-eromittaus

Paine-eromittauksella tutkitaan rakennuksen painesuhteita eri tilojen tai rakenteiden välillä. Mittausta voi tehdä myös sisä- ja ulkoilman välillä. Paine-eromittaus toteutetaan sähköisellä paine-eromittarilla. Mittaus voidaan tehdä hetkellisenä mittauksena projektin yhteydessä tai jatkuvana mittauksena. Merkkiainekokeen yhteydessä tehdään usein paine-eromittaus. Mittauksilla saadaan tietoa ilmavirtauksia aiheuttavien paine-erojen suuruudesta, joita voidaan hyödyntää sisäilman korjaussuunnittelussa (Sisäilmayhdistys ry 2023a.)

3.2.3 Olosuhdemittaus

Olosuhdemittaus toteutetaan passiivisesti olosuhdemittarilla. Olosuhdemittari asetetaan tilaan, jossa se mittaa mittarikohtaisesti sisäilman erilaisia ominaisuuksia. Olosuhdemittauksista voidaan tehdä projektin yhteydessä tai jatkuvana mittauksena. Markkinoilla olevista olosuhdemittareista suppeimmassa

mittarissa mitataan ilman lämpötilaa ja kosteutta. Laajimmissa olosuhdemittareissa mitataan lämpötilaa, valoisuutta, ilmanpainetta, ilmankosteutta, hiilidioksidia, melua, hiukkasia ja VOC-yhdisteitä (Loopshore 2023b.)

Olosuhdemittauksen yksi tärkeimmistä mitattavista tekijöistä on ilman kosteuspitoisuus. Sisäilman optimaalinen kosteus on 20–60 %. Kesällä sisäilman kosteuspitoisuus on korkeampi kuin talvella. Luotettavien tulosten saamiseksi ilman kosteusmittaus toteutetaan 1...7 vuorokauden ajan. Ilman suhteellisella kosteusmittauksella selvitetään muun muassa sisäilman optimaalisuutta ja ilmanvaihdon toimivuutta (Ympäristöopas 2016, 62.)

3.2.4 Rakenneavaus

Rakenneavauksessa rakenteen pintamateriaaliin tai koko rakenteeseen tehdään halkaisijaltaan noin 110 mm reikä. Rakenneavaus tehdään lähtökohtaisesti riskirakenteeseen tai vaurioituneeseen rakenteeseen (KH 90-00394, 2007.) Tutkimuksella saadaan luotettavasi selville mitä materiaaleja rakenteessa on käytetty, miten paksuja rakennekerrokset ovat, erilaisten liitosten toteutusratkaisut, rakenteiden kunto silmämääräisesti sekä erilaisia materiaalinäytteitä (Sisäilmayhdistys ry 2023h). Haitta-aineiden ja mikrobien materiaalinäytteistä on kerrottu enemmän luvussa 3.1.3.

3.2.5 Kosteusmittaus

Kosteutta voidaan mitata ilmasta, rakenteen pinnalta tai rakenteen sisältä (Sisäilmayhdistys ry 2023d). Rakennusten kuntoarvioiden ja kosteuskartoitusten yhteydessä tehtävät kosteusmittaukset rajoittuvat yleensä materiaalia rikkomattomiin (ilma- ja pintamittaukset) menetelmiin, mutta myös rakenteen sisältä otettavia menetelmiä hyödynnetään luotettavien tulosten saamiseksi. Materiaalia rikkovia menetelmiä käytetään usein jatkotutkimuksina vaurion syyn

ja laajuuden kartoittamiseksi, jos rikkomattomista menetelmistä on saatu tuloksiksi poikkeavia kosteuspitoisuuksia (Merikallio 2000, 740.)

Pintamittaukset tehdään pintakosteusmittarilla rakenteen pinnalta. Mittaustulokset ja niiden tulkintakehys vaihtelee mittarikohtaisesti. Pintakosteusmittaus ei kerro rakenteen kosteuspitoisuutta, vaan sillä kartoitetaan alueita, joissa mittarin antamat arvot ovat poikkeavia muuhun rakenteeseen nähden. Pintakosteusmittarilla saatuja tuloksia ei voida verrata eri rakenteissa keskenään. Mittausmenetelmä on suuntaa antava, sillä mittarilla ei pysty selvittämään kuinka syvällä materiaalin mahdollinen kosteus on. Mittaustuloksiin voi myös vaikuttaa virhetekijöitä, kuten vesijohdot tai raudoitukset (Merikallio 2000, 741.)

Rakenteiden sisältä tehtävän kosteusmittauksen mittausmenetelmän valintaan vaikuttaa suuresti se, mitä materiaalia tutkitaan ja miten tarkat tulokset mittauksesta halutaan esittää. Rakenteiden sisältä otettavat menetelmät voidaan jakaa tarkkoihin ja suuntaa antaviin menetelmiin.

Tarkat menetelmät antavat nimensä mukaisesti tarkan suhteellisen tai painoprosenttisen kosteuspitoisuuden rakenteesta. Betonirakenteiden suhteellisen kosteuspitoisuuden määrittämiseen käytetään näytepala-, porareikä- ja viiltomittausmenetelmää. Punnitus-kuivausmenetelmää voidaan taas käyttää lähes minkä tahansa materiaalin painoprosenttisen kosteuspitoisuuden selvittämiseen (Ympäristöopas 2016, 54–56.)

Näytepalamenetelmässä kosteuspitoisuutta mitataan betonipalanäytteiden avulla. Näytteet otetaan betonista halutulta syvyydeltä, jonka jälkeen ne asetetaan koeputkeen. Koeputkeen asennetaan myös mittapää, jonka jälkeen koeputki tiivistetään. Kun tasapainotila koeputken ilmatilan ja näytepalojen välillä on saavutettu, luetaan tulokset sähköisellä mittalaitteistolla. Näytepalamenetelmässä näytteen tasaantumisaika on 5–12 tuntia (RT 103333, 2021.)

Porareikämenetelmässä kosteuspitoisuus mitataan betoniin poratusta reiästä. Menetelmässä reikä porataan haluttuun syvyyteen ja siihen asennetaan

mittausputki. Mittausputki tiivistetään putken ja betonin välistä sekä putken yläpäästä. Mittausreiän kosteuden tulee antaa tasoittua kolme vuorokautta porauksesta, jonka jälkeen mittaus suoritetaan sähköisellä mittalaitteistolla (RT 103333, 2021.)

Suuntaa antavien menetelmien tarkoituksena on määrittää rakenneosan poikkeavan korkea kosteuspitoisuus riittävän luotettavasti. Suuntaa antavia menetelmiä ovat piikkimittari, sekä tarkoissa menetelmissä mainitut näytepala- ja porereikämittaukset. Näytepala- ja porareikämittaukset ovat suuntaa antavia mittauksia silloin, kun niiden työohjeita sovelletaan. Soveltamisella tarkoitetaan esimerkiksi useiden näytteiden ottoa samasta reiästä tai menetelmissä määritellyjä tasaantumisaikoja ei noudateta. (Ympäristöopas 2016, 56–57.) Piikkimittaria voidaan käyttää esimerkiksi puun, betonin, tiilen ja eristeen kosteuden mittaamiseen (Merikallio 2000, 741).

Punnitus-kuivausmenetelmää sekä suuntaa antavia menetelmiä voidaan hyödyntää rakenneavausten yhteydessä. Porereikä- ja viiltomittausmenetelmien käyttö tarkkana menetelmänä ei onnistu rakenneavauksesta, sillä työohjeistusta on noudatettava täsmällisesti tarkan ja luotettavan tuloksen saamiseksi.

3.2.6 Lämpökuvaukset

Lämpökuvauksen tarkoituksena on määrittää rakennuksen vaipan lämpöteknistä kuntoa ja pintalämpötilajakaumaa. Kuvaukset toteutetaan lämpökameralla. Kuvauksella havaitaan rakenteiden lämpövuotokohdat rakenteita rikkomatta. Syy lämpövuodolle voi olla eristyspuute, ilmavuoto, kylmäsilta tai joissakin tapauksissa myös kosteusvaurio (RT 14-11239, 2016.)

4 Sisäilmakorjauksen suunnittelun taustatiedot

Sisäilmakorjauksen suunnittelu vaati suunnittelijalta laajasti tietoa ja osaamista eri aikakausien rakennetyypeistä, materiaaliratkaisuista ja mahdollisista riski- tai ongelmarakenteista. Tässä opinnäytetyössä taustatiedoilla tarkoitetaan näiden edellä esitettyjen asioiden tiedostamista ja hyödyntämistä korjaussuunnittelussa. Koska työn esimerkkikohteena luvussa 5 on koulurakennus, on seuraavaksi esitetty katsaus Suomen koulurakennusten historiasta ja niissä käytetyistä rakennetyypeistä. Samoja rakennetyyppejä ja -ratkaisuja on käytetty myös muissa aikakausille tyypillisissä rakennuksissa.

4.1 Suomalaisten koulurakennusten historia

Suomessa on alettu rakentaman opetustarkoitukseen käytettäviä koulurakennuksia 1870-luvulta lähtien, kun asetus kansakouluista astui voimaan vuonna 1866 (Arkkitehtimuseo 2023a). Koulurakennusten historiaan on Suomessa vaikuttanut muun muassa lainsäädäntö, Suomen itsenäistyminen, 1940-luvun sodat, 1960-luvun muuttoliike maalta kaupunkiin ja 1970-luvun pedagogisten menetelmien muutos.

Koulurakennusten historian selvittäminen on ajoittain haasteellista. Rakennuksen käyttötarkoitus on voinut muuttua tai se on saatettu jo purkaa. Lisäksi haasteita taustojen selvitystä vaikeuttaa mahdolliset saneeraukset tai lisärakennukset, joita alkuperäiseen rakennukseen on toteutettu. Myös koulun nimi on voinut vuosien saatossa muuttua ja yhdessä rakennuksessa on voinut toimia useampi koulu. Suomen koulurakennukset voidaan jakaa rakennusajankohtansa, rakennustapansa ja rakennustyylinsä mukaan seuraavaksi esitettyihin aikakausiin.

4.1.1 1880–1910-luvun massiivitiilirakennukset

1800-luvun loppupuolella kaupunkeihin rakennettiin oppikouluja massiivitiilestä (Arkkitehtimuseo 2023a). Rakennuksissa on tyypillisesti betoni- tai puualapohja, puurakenteiset väli- ja yläpohjat, auma- tai harjakattoinen peltinen vesikate, massiivitiilimuurattu runko ja rapattu tai tuulimuurattu julkisivu (Terveet tilat 2028, 2023a). Oppilaitoksen sisällä on usein juhlava aula portaikkoineen ja leveä keskuskäytävä, josta on kulku toisiaan muistuttaviin luokkahuoneisiin (Arkkitehtimuseo 2023a). 1900-luvun alkupuolella koulurakennusten suunnitteluun vaikutti kansallisromantiikka, jolloin koulurakennuksista tehtiin aikaisempiin verrattuna astetta koristeellisempia, sileäksi rapatulla julkisivulla ja ornamenttikoristeilla (Arkkitehtimuseo 2023b).

4.1.2 1880–1920-lukujen hirsirakennukset

1880–1920-lukujen hirsikouluja varten koottiin valtakunnalliset maalauskansakoulujen mallipiirustukset vuosina 1892 ja 1921. Mallipiirustukset poikkeavat toisistaan suurimmaksi osaksi siinä, että 1892 mallit olivat yksikerroksisia ja 1921 kaksikerroksisia rakennuksia (Arkkitehtimuseo 2023a & 2023b.) Aikakauden hirsikoululle tyypillistä ovat puurakenteiset ala-, väli- ja yläpohjat, harja- tai aumavesikatto pelti- tai tiilikatteella, hirsirunko sekä vaaka- ja pystylaudoituksella verhoiltu julkisivu (Terveet tilat 2028, 2023b).

4.1.3 1920–1930-lukujen massiivitiilirakennukset

1920–1930-luvulla monikerroksisia massiivitiilikouluja rakennettiin kaupunkeihin ja taajamiin (Terveet tilat 2028, 2023c). Rakennukset edustavat usein funktionalismia, jossa korostuva selkeys, tarkoituksenmukaisuus ja linjakkuus (Arkkitehtimuseo 2023c). Aikakauden rakennusten rakenteet ovat tyypillisesti betoninen alapohja, alalaatta- tai kaksoislaattarakenteiset väli- ja yläpohjat, pelti- tai tiilikatteinen harja- tai aumavesikatto, massiivitiilirunko ja rapattu tai tiilimuurattu julkisivu (Terveet tilat 2028, 2023c). Koulurakennuksissa on

kyseisellä aikakaudella korostettu päivänvaloa suuremmilla ikkunoilla ja eri tilat on suunniteltu eri siipiin (Arkkitehtimuseo 2023c).

1940-luvulla Suomessa käytiin sotaa, eikä kouluja tänä aikana juurikaan rakennettu. Sotien jälkeen 1940-luvun loppupuolella koulurakennuksia tarvittiin lisää pakolaisille ja suurille ikäluokille. Tällöin maaseudulle rakennettiin pieniä puisia tyyppikouluja ja kaupunkeihin monikerroksisilla, harjakattoisilla ja punatiiliverhoiltuja koulurakennuksia (Arkkitehtimuseo 2023c.)

4.1.4 1950–1960-lukujen tiiliverhoillut betonirakennukset

Koulurakennuksia rakennettiin 50- ja 60-luvuilla pääsääntöisesti kaupunkeihin ja kuntiin (Terveet tilat 2028, 2023d). 1960-luvulla tapahtui muuttoliike maalta kaupunkeihin, jonka seurauksena satoja kansakouluja maaseudulta lakkautettiin (Arkkitehtimuseo 2023d). Aikakaudella rakennuksia alettiin madaltaa ja pohjaratkaisuissa kokeiltiin vapaammin erilaisia ratkaisuja, joista syntyi erilaisia koulutyyppejä, kuten hallikoulu, solukoulu ja paviljonkikoulu (Arkkitehtimuseo 2023d). Koulurakennuksissa alapohjat ovat usein kaksoisbetonilaattarakenteita, väli- ja yläpohjat betonisia kotelorakenteita, vesikatto on harja- tai pulpettikatto pelti- tai tiilikatteella, runko pilari-palkkirakenteinen ja julkisivut betonia, kalkkihiekkatiiltä tai punatiiltä (Terveet tilat 2028, 2023d). Aikakauden kouluille on tyypillistä kaksi- tai kolmikerroksisuus, nauhamaiset ikkunalinjat ja lyhyet räystäät (Arkkitehtimuseo 2023d).

4.1.5 1970–1980-lukujen elementtirakennukset

1970–1980-luvuilla koulurakennuksia rakennettiin erityisesti isoihin kaupunkeihin (Terveet tilat 2028, 2023e). 1970-luvulla tapahtui pedagogisten menetelmien muutos, kun piirtoheittimet tulivat kouluihin ja perinteisen opettajajohtoisen opetuksen rinnalle tuli suurryhmä-, pienryhmä- ja yksilöopetus. Eri oppiaineille määriteltiin omat opetustilansa, tiloja jaettiin siirrettävillä väliseinillä ja avoimuuden lisäksi käytettiin lasia väliseinärakenteina (Arkkitehtimuseo 2023e.)

Aikakaudelle tyypilliset rakenteet ovat kaksoisbetonilaattainen alapohjarakenteet, ontelolaatat väli- ja yläpohjissa, bitumikermikate tasakatolla, elementtirakenteinen (betonisandwich-elementti) runko ja elementtipintaiset julkisivut (Terveet tilat 2028, 2023e).

4.1.6 1990–nykyaika hybridirakennukset

1990-luvulta tähän päivään asti kouluja rakennetaan niin kaupungeissa kuin kunnissakin. Aikakauden kouluille ei voida antaa yleistettäviä rakennetyyppejä, sillä rakennuksen runko voi olla toteutettu betonista, teräksestä tai puusta. Runko voi olla myös näiden yhdistelmä eli sekarunkoinen rakennus. Rakennuksissa voi olla maanvastaisia ja ryömintätilaisia betonisia alapohjarakenteita. Väli- ja yläpohjat ovat tyypillisesti ontelolaattoja. Vesikattojen kattomuodot ovat usein moninaiset, ja ne voivat sisältää harja-, pulpetti- ja tasakattorakenteita. Vesikate voi olla peltiä, tiiltä tai bitumikermiä. Rakennuksen julkisivut voivat olla betonia, tiiltä tai puuta (Terveet tilat 2028, 2023f.)

4.2 Betonirunkoiset rakennukset

Betonirakentaminen rantautui Suomeen 1800-luvun loppupuolella ja jolloin Suomeen avattiin myös ensimmäinen sementtitehdas (toiminnassa vuosina 1869–1894). Betonia käytettiin tuolloin vain vaativiin rakenteisiin, sillä betonia ja sen käyttöä ei tunnettu vielä niin hyvin, että sitä olisi suunniteltu tavanomaisiin rakennuksiin tai rakenteisiin. Suomen ensimmäinen koulurakennus, jossa on käytetty teräsbetonirakenteita, on Viipurin tyttökoulu, joka on rakennettu vuonna 1905 (Hytönen & Seppänen 2009, 14–15.)

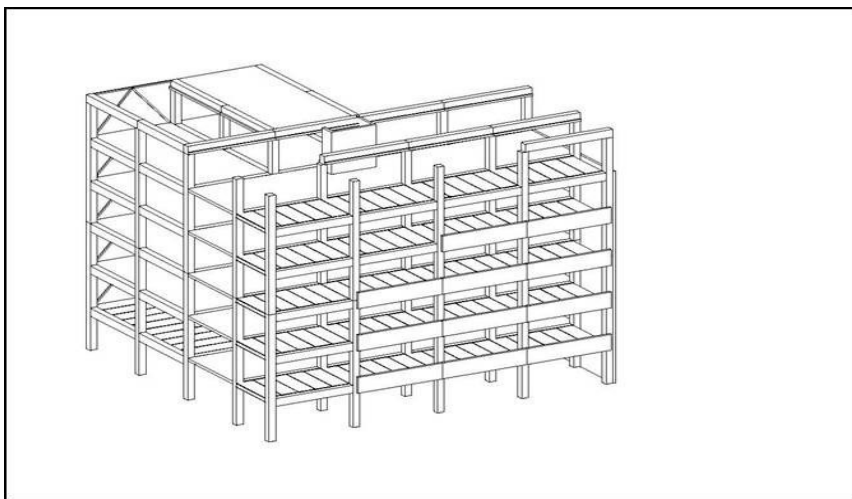
Betonin läpimurto Suomessa tapahtui teollistumisen aikaan 1920–1950-luvuilla, jolloin betonia alettiin käyttämään kaikilla rakentamisen osa-alueilla (Betoni 2023). 1950-luvulle asti koulurakennusten runko oli pääsääntöisesti tiiltä tai hirttä. Betonirunkoiset koulurakennukset yleistyivät 1960-luvulla (Terveet tilat 2028, 2023d).

Rakennuksen rungolla tarkoitetaan sen kantavia pysty- ja vaakarakenteita, jotka ohjaavat rakennukseen vaikuttavat kuormitukset perustuksille ja niiltä edelleen maahan. Runkorakenteisiin katsotaan lähtökohtaisesti kuuluvaksi ala-, väli- ja yläpohjat, sillä ne toimivat betonisten rakennuksen runkojärjestelmässä usein vaakakuormia jäykistävänä rakenneosana. Rakennuksen runkoon eivät kuulu perustukset, vesikatto tai ei-kantavat ulkoseinät.

4.2.1 Betoniset runkojärjestelmät

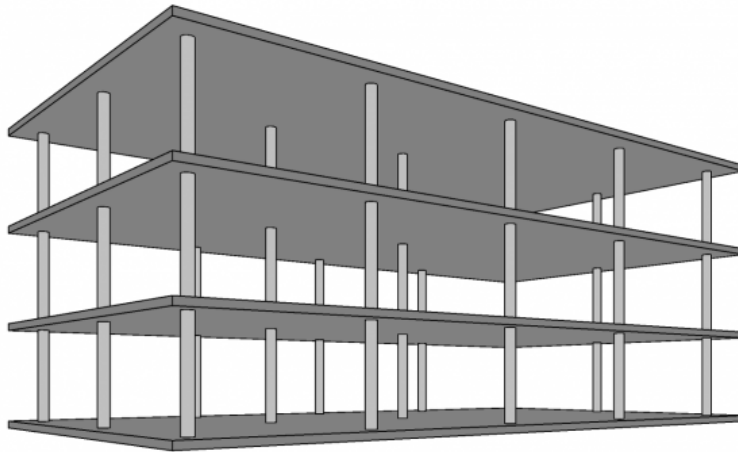
Betoniset runkorakenteet voidaan toteuttaa elementteinä, paikallavalurakenteina tai näiden yhdistelminä (Betonitieto 2023b). Betonisia runkojärjestelmiä ovat pilari-palkki-, pilari-laatta- ja seinä-laattarunkojärjestelmä (Elementtisuunnittelu 2020).

Pilari-palkkirunkojärjestelmiä (kuva 8) käytetään usein toimisto- ja liikerakennuksissa, sillä runkojärjestelmä mahdollistaa tilojen paremman muuntojoustavuuden. Järjestelmän palkkirakenteet ovat tyypillisesti suorakaide- ja leukapalkkeja. Pystyrakenteet taas teräsbetonibetoni- tai liittopilareita. Väli- ja yläpohjina toimivat ontelo- ja kuorilaatat (Elementtisuunnittelu 2020.)



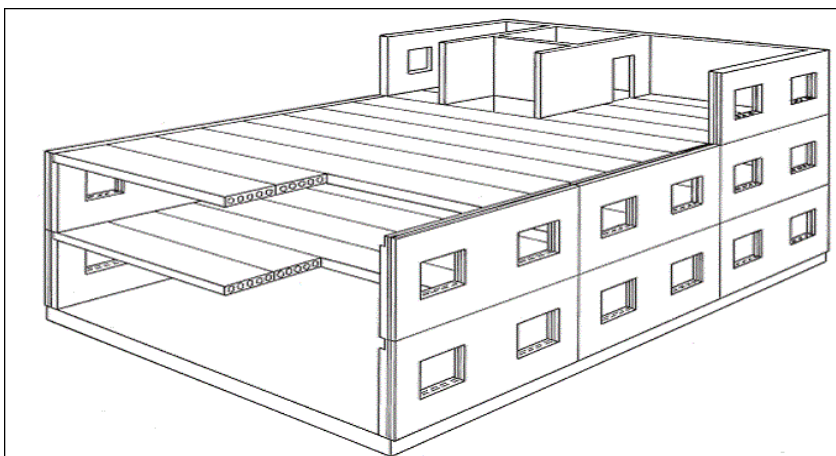
Kuva 8. Pilari-palkkirunkojärjestelmä (Elementtisuunnittelu 2020).

Pilari-laattarunkojärjestelmää (kuva 9) käytetään liike- ja toimistorakennuksissa sekä pysäköintilaitoksissa. Järjestelmä mahdollistaa tilojen muunneltavuuden sekä pitkät jännevälit, mikäli laatat toteutetaan jälkijännitettynä (Betonitieto 2023a.) Pilarit toteutetaan tyypillisesti teräsbetonirakenteisina ja laatat joko teräsbetonirakenteisina tai jälkijännitettyinä rakenteina.



Kuva 9. Pilari-laattarunkojärjestelmä (Betonitieto 2023a).

Seinä-laattarunkojärjestelmä (kuva 10) käytetään eniten kerrostalorakentamisessa, sillä se on yksinkertaisin tapa toteuttaa asuinrakentamista (Betonitieto 2023a). Järjestelmän vaakarakenteet ovat tyypillisesti ontelolaattoja ja pystyrakenteet elementtejä.



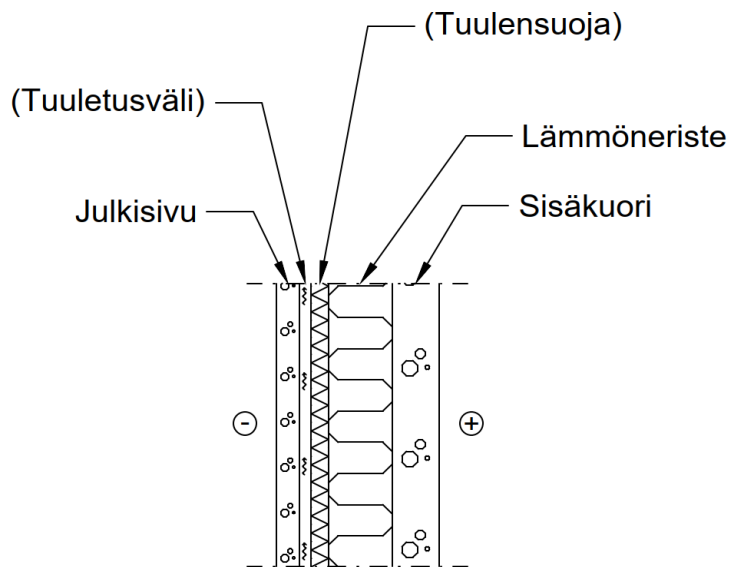
Kuva 10. Seinä-laattarunkojärjestelmä (Elementtisuunnittelu 2020).

Betonisten rakennusten runkojärjestelmällä ei ole kovinkaan suurta merkitystä sisäilmaongelmia aiheuttavana tekijänä. Oleellisempaa onkin sen, mitä rakenteita ja rakenneosia runkojärjestelmään ja perustuksiin kiinnitetään. Korjaussuunnittelua tehdessä on tärkeä selvittää kohteen runkojärjestelmä, sillä se vaikuttaa oleellisesti korjaussuunnitteluun, vaikka sisäilmaongelmat eivät koskisikaan kyseisiä rakenteita. Seuraavissa luvuissa on esitetty betonirunkoisille rakennuksille tyypilliset rakenteet ulkoseinästä, maanvastaisesta seinästä ja alapohjasta.

4.2.2 Betonirunkoisen rakennuksen tyypillinen ulkoseinärakenne

Betonirunkoisen rakennuksen ulkoseinärakenteeseen kuuluu tyypillisesti sisäkuori, lämmöneriste ja julkisivu. Sisäkuori on materiaaliltaan betonia tai tiiltä ja se voi toimia kantavana rakenteena, jolloin se on osa runkojärjestelmää. Sisäkuori voi olla myös ei-kantava, jolloin se toimii vain ulkoseinän tukirakenteena. Sisäkuori toimii rakenteessa myös vaipparakenteena. Lämmöneriste on tyypillisesti mineraalivillaa ja sen päätehtävä on muodostaa lämpöä eristävä kerros sisä- ja ulkoilman välille. Lämmöneriste toimii myös äänieristeenä. Julkisivun materiaalina voi olla betoni, tiili, levyverhous, pelti tai puu ja sen tarkoitus on estää ja ehkäistä kosteuden pääsyä rakenteeseen. Julkisivu voi olla eristeen tapaan kiinnitetty sisäkuoreen, tai se voi materiaalin ja ulkoseinäjärjestelmän mukaan kantaa oman painonsa.

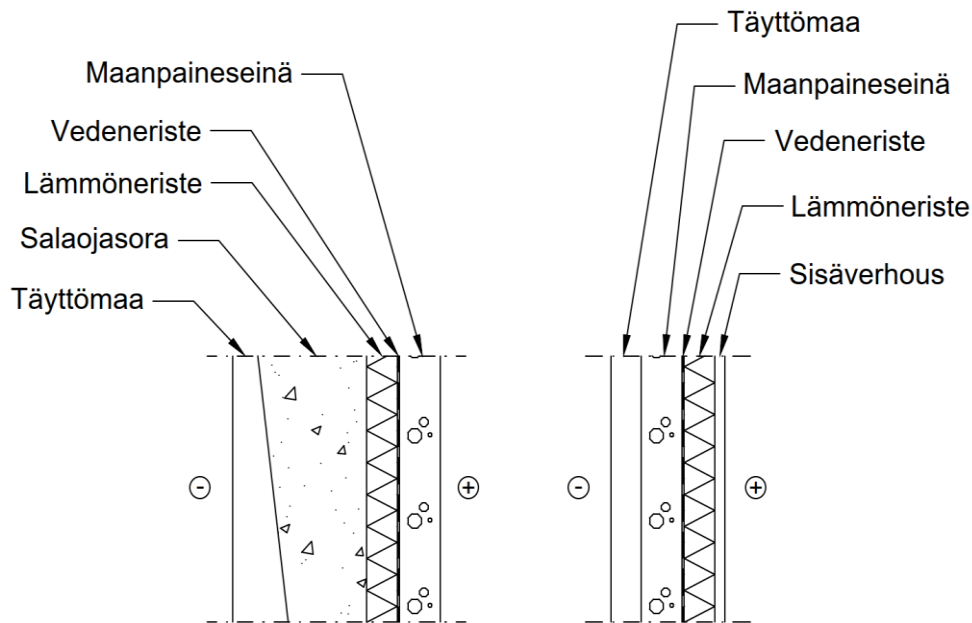
Lämmöneristeen ja julkisivun välissä voivat olla tuulensuoja ja tuuletusväli, mutta kaikissa rakenteissa näitä ei esiinny, esimerkkinä tästä on betonisandwich-elementti. Tuulensuojan tarkoitus on estää ilman ja sen mukana kulkeutuvan kosteuden pääsy eristekerrokseen, ja näin ollen parantaa lämmöneristeen toimivuutta. Tuulensuojamateriaaleja ovat tuulensuojalevyt, -villat ja -kalvot. Tuuletusvälin tarkoitus on mahdollistaa julkisivun nopea kuivuminen ja ylimääräisen kosteuden siirtyminen pois rakenteesta, tuli se sitten sisä- tai ulkopuolelta. Tyypillinen betonirunkoisen rakennuksen ulkoseinärakenne on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Tyypillinen betonirunkoisen rakennuksen ulkoseinärakenne.

4.2.3 Betonirunkoisen rakennuksen tyypilliset kellarinseinärakenteet

Betonirunkoisen rakennuksen tyypilliseen kellarinseinärakenteeseen kuuluu maanpaineseinä, vedeneriste ja lämmöneriste kuvan 12 mukaisesti. Maanpaineseinä on tyypillisesti betonia ja sen tehtävä on välittää kuormat ulkoseinältä ja ympäröivästä maasta perustuksille ja sieltä edelleen maahan. Vanhemmissa rakennuksissa veden- ja lämmöneriste on tyypillisesti asennettu maanpaineseinän lämpimälle puolelle maanvastaisena seinänä, mutta nykypäivänä ne laitetaan paremman rakennusfysikaalisen toimintansa takia maanpaineseinän kylmälle puolelle.



Kuva 12. Tyypilliset betonirunkoisten rakennusten kellarinseinärakenteet. Oikeanpuoleinen ratkaisu ei ole rakennusfysikaalisesti yhtä toimiva kuin vasemmanpuoleinen, mutta kyseistä rakennetta on käytetty aikaisemmin kellarinseinärakenteissa.

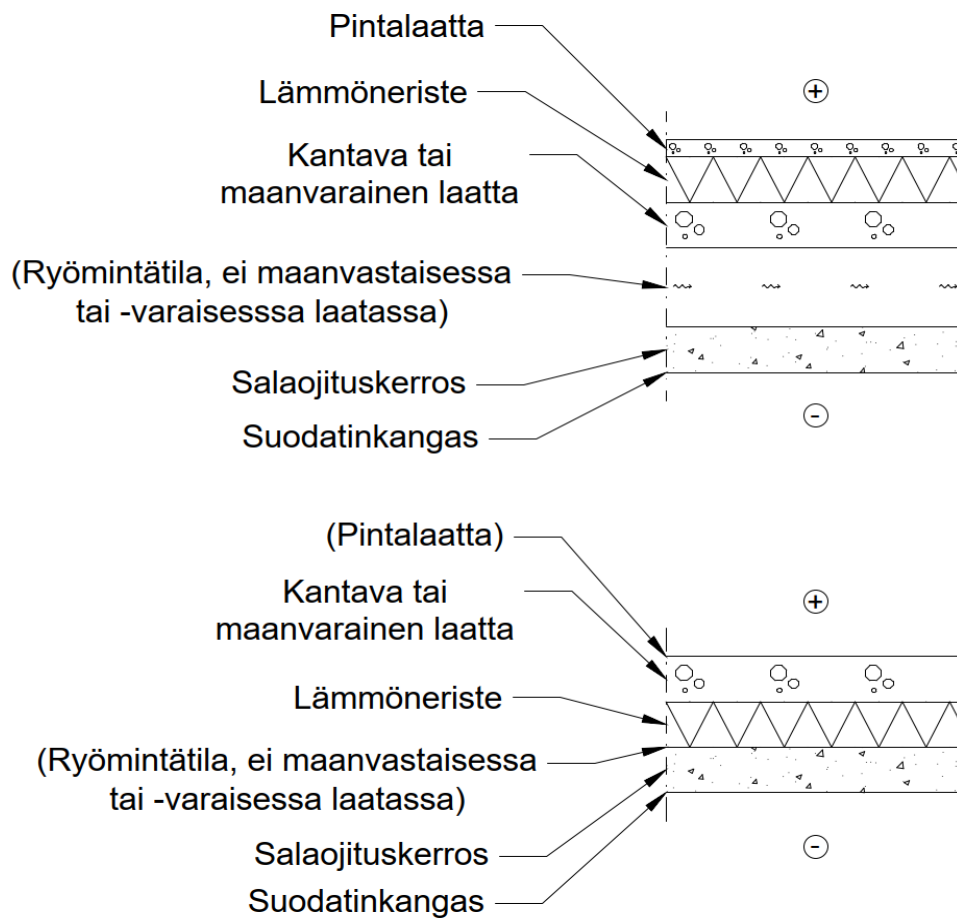
Vedeneristeiden tarkoitus on nimensä mukaisesti estää maan kosteuden pääsy rakenteen läpi. Vedeneriste toteutetaan nykypäivänä kumibitumikermillä ja aikaisemmin se on toteutettu bitumi- tai pikisivelyllä. Lämmöneristeinä käytetään nykyisin tyypillisesti EPS-eristettä. Lämmöneristeiden päätehtävä ovat lämpimän ilman pitäminen sisäpuolella.

Kellariseinän rakenteisiin kuuluu myös tyypillisesti salaojituskerros sekä sisäverhous. Salaojasora levitetään seinän viereen kaistaksi ja sen tarkoitus on siirtää kosteus maanpinnalta salaojiin niin, että kosteus ei jää viipymään rakenteisiin. Sisäverhouksen tehtävä on suojata lämmöneristettä, ja se voidaan toteuttaa esimerkiksi tiilimuurauksella tai kipsilevyllä.

4.2.4 Betonirunkoisen rakennuksen tyypilliset alapohjarakenteet

Tyypilliseen alapohjarakenteeseen kuuluu betonilaatta ja lämmöneriste, kuten kuvassa 13 on esitetty. Alapohjarakenteeseen on kahdenlaista perustamistapaa:

kantava laatta tai kantavan maakerroksen päälle valettu laatta. Kantava laatta taas voi olla rakennettu kahdella tavalla: laatan ja maan välissä on ryömintätila, tai laatta on suoraan maanpinnan yläpuolella maanvastaisena laattana. Kun maakerros toimii kantavana rakenteena ja laatta valetaan sen päälle, on kyseessä maanvarainen laatta. Lämmöneriste voi näissä kaikissa tapauksissa olla betonilaatan ylä- tai alapuolella, nykyisin lämmöneriste sijoitetaan laatan alapuolelle. Lämmöneriste on nykyään tyypillisesti EPS-eriste, kun taas vanhemmissa rakenteissa on voitu käyttää esimerkiksi toja-levyä.



Kuva 13. Tyypilliset betonirunkoisten rakennusten alapohjarakenteet.

Muita rakenneosia alapohjarakenteessa ovat suodatinkangas, salaojituseros, ryömintätila ja pintalaatta. Suodatinkankaan tarkoitus on estää salaojasoran ja maa-aineksen sekoittuminen keskenään. Suodatinkangasta voidaan käyttää myös eri rakennekerrosten välissä, jolloin sen tehtävä on estää kitkan

muodostumista. Salaojituserrosta käytetään kaikissa alapohjatyypeissä maankosteuden kapillaarikatkona. Ryömintätilan tarkoitus on tuulettaa alapohjarakenteita ja mahdollistaa alapohjaan pääsy. Ryömintätilaa ei ole maanvastaisessa tai -varaisissa alapohjarakenteessa. Betoninen pintalaatta voidaan valaa lämmöneristeen tai betonilaatan päälle. Lämmöneristeen päällä sen tehtävä on toimia lattiarakenteen alustana. Lämmöneristeen ollessa kahden betonilaatan välissä, on rakennetyyppi nimeltään kaksoisbetonilaattarakenne. Pintalaatta voidaan valaa myös betonilaatan päälle, jolloin siihen voidaan asentaa esimerkiksi lattialämmitys.

4.3 Betonirunkoisten rakennusten riskit ja ongelmat

Sisäilmaongelman aiheuttaja voi olla melkein missä tahansa rakenteessa. Ongelma löytyy todennäköisimmin kuitenkin rakennuksen alaosasta, sillä alaosan rakenteisiin kosteus vaikuttaa eniten. Betonirunkoisissa rakennuksissa voi olla useita riskitekijöitä, jotka mahdollistavat kosteus- ja mikrobivaurion muodostumisen. Rakenteellisesta näkökulmasta tarkasteltuna, rakenteiden ongelmat voivat johtua virheellisestä suunnittelusta ja/tai toteutuksesta, sekä aikaisemmin hyvinä pidetyistä rakenne- tai materiaaliratkaisuista, jotka ovat nykyisin on todettu ongelmallisiksi. Vaikka nykypäivän rakennusmateriaaleille määritelläänkin tiukat vaatimukset, ei kaikista tuotteista vielä tiedetä esimerkiksi sitä, miten ne reagoivat viereisten materiaalien kanssa tietyissä olosuhteissa. Näin ollen mahdollista on myös se, että uudessakin rakennuksessa on sisäilmaongelma. Liitteessä 2 on taulukoitu rakenteittain sisäilmaan vaikuttavia tekijöitä kosteus- ja mikrobivaurioiden kannalta ja liitteessä 3 muiden haitta-aineiden kannalta.

4.3.1 Todennäköisimmät aiheuttajat

Kosteudenhallinta on avainsana kosteus- ja mikrobivaurioiden estämiseksi. Kosteus on tekemisissä jokaisen rakenneosan kanssa ja oleellista onkin se, miten rakenteita tuuletetaan ja suojataan kosteudelta. Kosteus voi aiheuttaa

rakenteessa ongelmia, jos esimerkiksi salaojat, vedeneristykset ja kapillaarikatkot ovat puutteellisia, rakenteet ovat tuulettumattomia tai rakenteisissa on orgaanista materiaalia. Kun rakenteeseen tuleva kosteusvirta on suurempi kuin rakenteesta poistuva kosteusvirta, rakenteeseen muodostuu kosteusvaurio. Mikrobivaurion muodostumiseen vaikuttaa rakenteen homehtumisherkkyys kuvan 5 mukaisesti.

VOC-yhdisteet ovat betonirunkoisissa rakennuksissa ongelma etenkin muovimattojen yhteydessä, joissa muovimatto on liimattu betonilaatan päälle. Betonin kuivuminen tasapainotilaan ympäröivän ilman kanssa voi kestää vuosia, jolloin betonista haihtuva kosteus reagoi muovimaton liimauksen kanssa. Tästä aiheutuu sisäilmaan VOC-päästöjä ja mahdollisesti myös ammoniakkaa, mikäli liima sisältää kaseiiniproteiineja. Betonin alkalisella kosteudella eli sen pH-arvolla on tutkittu olevan myös yhteys VOC-päästöihin betonilaatan päälle liimatussa muovimatossa. Kun betoni- tai pintalaatta on hyvin emäksinen, on VOC-yhdisteiden muodostuminen todennäköisempää. Kouluissa on käytetty muovimattoja lattianpäällysteinä esimerkiksi niiden kestävyuden, edullisuuden, ylläpidon ja akustisten ominaisuuksien takia.

Puutteelliset tai vaurioituneet pintamateriaalit tai eristeet voivat toimia hiukkas-, pöly- tai kuitulähteenä. Koulurakennuksissa käytetään esimerkiksi paljon alakattoja ja akustiikkalevyjä. Alakatot keräävät usein pölyä alakattorakenteeseen, joka päättyy epätiiviin alakaton läpi sisäilmaan. Puutteellisesti saumatuista ja vaurioituneista akustiikkalevyistä irtoaa kuituja sisäilmaan. Myös ilmanvaihtojärjestelmässä voi olla hiukkasia, pölyä ja kuituja, joista osa on voinut olla siellä jo rakennusvaiheesta asti, mikäli pölynhallintaan ei ole tällöin kiinnitetty huomiota. Järjestelmä tulee myös puhdistaa säännöllisesti. Kohteen käyttäjät näkevät vaurioituneen pintamateriaalin usein vain esteettisenä haittana, mutta sillä voi olla vaikutusta myös rakennuksen terveellisyyteen.

4.3.2 Epätodennäköisimmät aiheuttajat

Formaldehydin ja styreenin esiintymistä voisi pitää enemmän materiaalisena kuin rakenteellisena ongelmana. Kyseisiä yhdisteitä sisäilmaongelman aiheuttajana voidaan epäillä niiden tunnistettavien hajujensa perusteella. Molemmat myös aiheuttavat ihmiselle lähtökohtaisesti ärsytysoireita. Epäilyn voi herättää myös se, jos rakenteissa on käytetty paljon lastulevy- tai kestopuovirakenteita. Formaldehydiä ja styreeniä ei todennäköisesti ensimmäisenä epäillä sisäilmaongelman aiheuttajana, sillä haitallisia ainepitoisuuksia muodostuu lähtökohtaisesti materiaaliominaisuuksien seurauksena tai materiaalin valmistusvirheestä.

PAH-yhdisteitä sisältäviä kivihiilitervatuotteita on voitu käyttää rakentamisessa vuoteen 1995 asti. Tätä ennen rakennetuissa kouluissa voi esiintyä PAH-yhdisteitä useimmiten kellarinseinissä, alapohjassa, ulkoseinissä ja vesikatossa. PAH-yhdisteiden tunnistaminen rakenteesta tai rakenneavauksesta on siinä mielessä helppoa, että niillä on hyvin tunnusomainen väri ja haju.

Radonilla ja PCB-yhdisteillä on yhteistä se, että niitä ei lähtökohtaisesti näe, eikä niillä ole mitään tunnusomaista hajua. Kyseiset tekijät eivät myöskään aiheuta välittömiä ja tunnistettavia oireita, vaan altistuminen havaitaan (jos havaitaan) vasta vuosien päästä. Radon ja PCB-yhdisteet eivät näin ollen ole sisäilmaongelman aiheuttajan selvittämisessä kovinkaan keskeisessä roolissa. Radonmittauksia suositellaan tehtäväksi 10 vuoden välein.

Ilmansaasteet on mainittu yhtenä rakenteellisena häirtatekijänä luvussa 2.3.3. Ilmansaasteita voi päätyä sisäilmaan epätiivien rakenteiden läpi. Jos rakenteet ovat epätiivit, sisäilmaan päätyy todennäköisesti muitakin häirtatekijöitä, jotka ovat usein ilmansaasteita ongelmallisempia. Suomen ilmanlaatu on kansainvälisesti vertailtuna hyvää, joten ilmansaasteet sisäilmaongelman aiheuttajana on hyvin epätodennäköinen.

4.4 Suunnittelun lähtökohdat

Korjaussuunnitteluun lähdetessä on tiedettävä ja sisäistettävä paljon aiheeseen liittyvää tietoa. Suunnittelijan on kerättävä taustatietoa siitä, millaisia rakenteita ja materiaaleja on kyseisenä rakennusajankohtana käytetty. Näistä rakenteista ja materiaaleista pitää selvittää se, ovatko ne jollakin tapaa ongelmallisia, ja jos ovat niin millä tavalla.

Kohteen lähtötiedoista ja piirustuksista saadaan tietoa siitä, milloin kohde on rakennettu, miten se on rakennettu, minkälaisia rakenneratkaisuja ja materiaaleja on käytetty. Tausta- ja lähtötietoja vertailemalla keskenään, voidaan saada jonkinlainen käsitys mahdollisesta sisäilmaongelman aiheuttajasta.

Käyttäjäkyselyllä ja kohdekäynnillä saadaan vielä lisää tietoa ongelman aiheuttajasta. Arvokasta tietoa on muun muassa missä päin rakennusta on oireilua, minkälaisia oireet ovat, onko ilmassa joitakin hajuja ja onko rakenteissa näkyviä vaurioita.

Taustatietojen, lähtötietojen, käyttäjäkyselyn ja kohdekäynnin pohjalta valitaan tehtävät tutkimukset. Ilmasta tehtävät tutkimukset eivät vielä kerro mikä mahdolliset rakenteet aiheuttavat ongelman, vaikka itse epäpuhtaus saataisiinkin selville. Tutkimuksia on tässä tapauksessa syytä jatkaa esimerkiksi materiaalinäytteillä ja rakenneavauksilla. Ongelman rakenteellisia lähteitä ja epäpuhtauksia voi olla myös useampia.

Tutkimusraporttiin kirjoitetaan toimenpide-ehdotukset tehtyjen tutkimusten perustella. Mikäli ehdotukset ovat ristiriidassa esimerkiksi lähtötietojen kanssa, on raportin luotettavuutta syytä epäillä. Luotettavan raportin pohjalta määritellään kohteen korjauslaajuus.

Korjauslaajuuteen vaikuttavat tutkimusraportin tulokset, käytössä oleva budjetti ja se, kuinka hyvä korjaus halutaan tehdä. Tässä kohtaa on syytä miettiä myös esimerkiksi se, korjataanko tunnettuja riskirakenteita, vaikka tutkimusraportissa niiden ei olisi todettu aiheuttavan ongelmia. Kohteelle on voitu määrittää myös tavoiteltu sisäilmastoluokitus (S1 – yksilöllinen (erittäin hyvä), S2 – hyvä tai S3 –

tydyttävä). Korjausvaihtoehdoista parempi on vaurioituneen tai haitallisen rakenteen tai materiaalin poistaminen ja rakenteen päivittäminen nykymääräyksiä vastaavaksi. Mikäli tämä ei ole mahdollista liian suurten kustannusten tai jonkun muun syyn vuoksi, epäpuhtauksien pääsy sisäilmaan estetään esimerkiksi kapseloimalla tai tiivistämällä.

Todellisuudessa tutkimukset ja korjaussuunnittelun hoitaa lähtökohtaisesti eri tekijät ja/tai yritykset. Korjauslaajuudesta taas päättää tilaaja ja/tai rakennuttaja. Korjaussuunnittelijalla on kuitenkin tärkeä rooli tuoda havaintonsa ja huomionsa esille esimerkiksi tutkimustulosten kyseenalaistamisesta tai korjauslaajuuden puutteista.

5 Esimerkki: Sisäilmaongelmainen koulurakennus

Esimerkkikoulu on varsinaissuomalainen koulurakennus, joka on rakennettu 1980-luvulla. Kohteessa on todettu sisäilmaongelma ja siihen on toteutettu sisäilma- ja seurantatutkimuksia. Kohteeseen on myös tehty korjaussuunnitelma.

5.1 Lähtötiedot

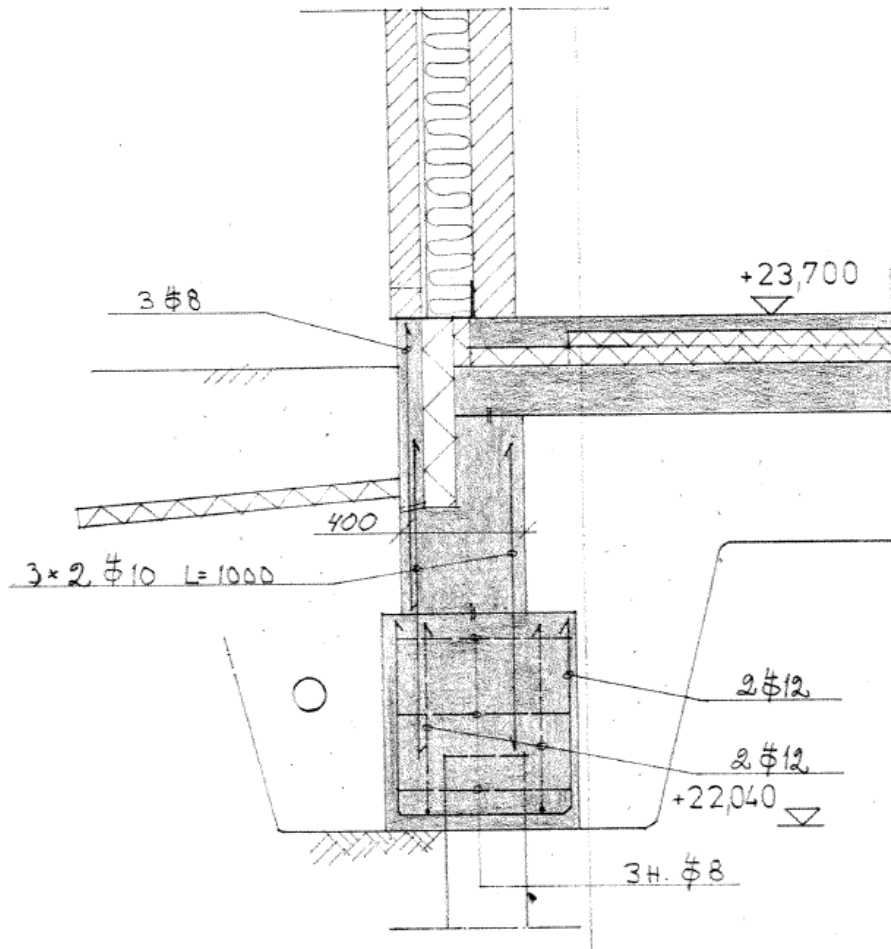
Kohteesta on lähtötietoaineistona käytettävissä alkuperäiset ARK-, RAK ja LVIS-piirustukset. Kohde on paalutettu ja sen alapohjarakenteena on kantava maanvastainen kaksoisbetonilaatta. Runkojärjestelmä on pilari-laattajärjestelmä ja ei-kantavat ulkoseinät ovat pääosin betoni- ja tiilirakenteiset. Kohteessa on kaksoisbetonirakenteinen kellarinseinä. Väli- ja yläpohjat ovat betonirakenteisia. Koulurakennuksen vesikatto on monimuotoinen sekakatto, jossa katemateriaalina on bitumihuopa ja pelti. Väliseinät ovat tiili-, betoni- ja puurakenteisia. Alapohjan alapuolella kulkee myös tekniikkatunneli rakennuksen läpi.

5.2 Taustatietojen ja lähtötietojen vertailu

Perustus- ja perusmuurirakenteita tarkasteltaessa esiin nousee neljä mahdollista ongelman aiheuttajaa tai mahdollistajaa, jotka ovat havaittavissa kuvassa 14. Perustusta tai perusmuuria ei ole piirustusten mukaan vedeneristetty, joten kosteuden siirtyminen betonirakenteiden läpi alapohjaan on todennäköisempää. Myös matala sokkelikorkeus edesauttaa kosteuden siirtymistä rakenteisiin. Suunnitelmiin piirrettyjen salaojien sijainti anturaan nähden on liian korkea, mikä aiheuttaa kysymyksen salaojien toimivuudesta. Perusmuurin keskellä oleva sokkelihalkaisu taas kerää eristeeseen kosteutta, mikäli vedenpoistoputket eivät ole toimivat tai niitä ei ole.

Alapohjarakenteessa ongelmia saattaa aiheuttaa maanvastainen laatta. Mikäli kapillaarikatko toimii puutteellisesti, kosteus pääsee siirtymään

alapohjarakenteeseen. Alapohja on myös kaksoisbetonilaattarakenteinen, joten on mahdollista, että lämmöneristeeseen on kertynyt kosteutta. Kuvassa 14 on esitetty kohteen alapohjarakenteen leikkaus.

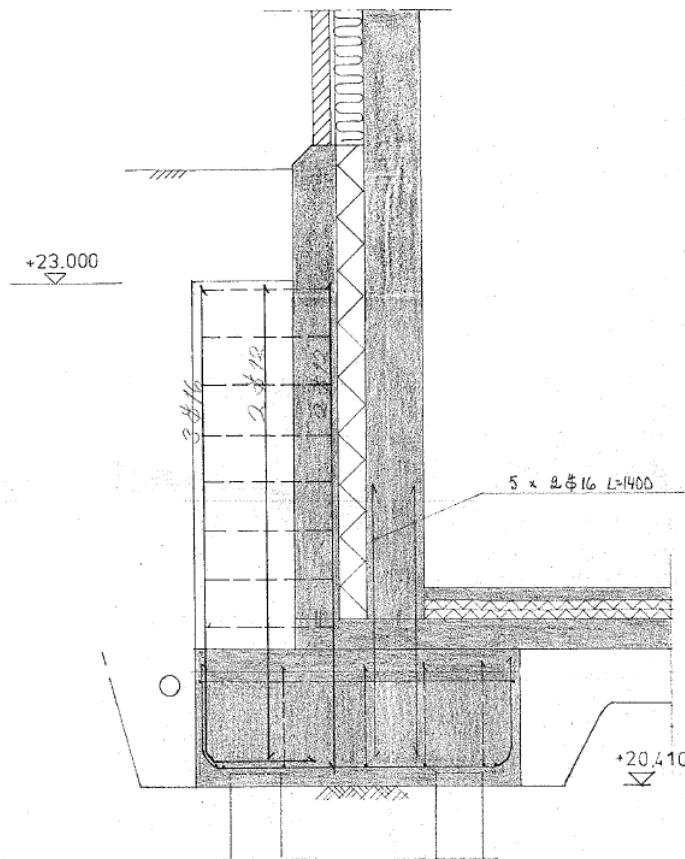


Kuva 14. Esimerkkikohteen perustus-, alapohja- ja ulkoseinärakenne.

Ulkoseinärakenteissa ongelmien aiheuttajia tai mahdollistajia on useampia, kuten kuvasta 14 voi havaita. Mahdollisesti puutteelliset tuuletusvälit ja -raot estävät rakennetta tuulettumasta, jolloin rakenteeseen voi kertyä kosteutta. Suunnitelmiin piirretyissä rakenteissa ei esiinny tuulensuojaa, joten kosteutta siirtyy helpommin lämmöneristeeseen. Ulkoseinän ulkoverhous on moduulitiiltä (85 mm) ja se suojaa rakennetta huomattavasti sateelta kuin se, että tiilijulkisivu olisi leveydeltään peruskokoista (130 mm). Suunnitelmissa on perusmuurin ja ulkoseinärakenteen välissä esitetty kapillaarikatko, mutta mikäli siinä on puutteita, voi kosteus nousta

myös perusmuurista ulkoseinärakenteeseen. Sisäkuoren ja alapohjan välinen epätiivis liittyminen voi omalta osaltaan vaikuttaa kosteuden siirtymiseen ja epäpuhtauksien pääsyyn sisäilmaan.

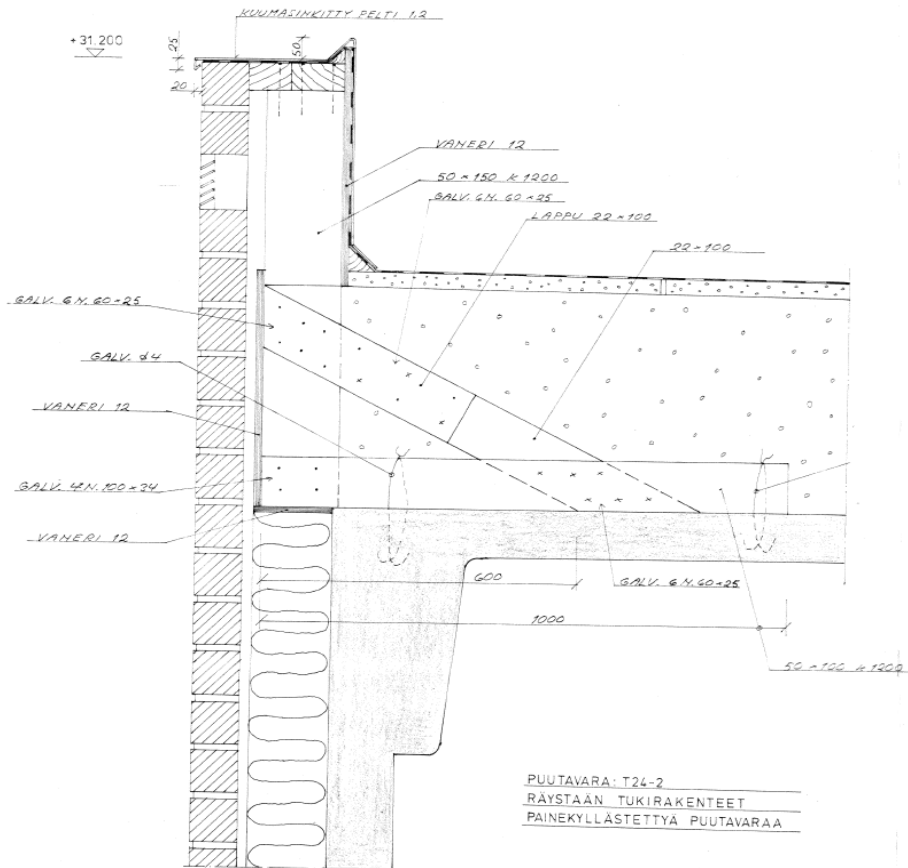
Kellarinseinässä huolenaiheita herättävät vedeneristämätön rakenne, sokkelihalkaisu ja kylmäsilta anturasta sisäkuoreen. Kaikki edellä esitetyt puutteet ja ratkaisut lisäävät rakenteiden kosteusrasitusta. Kellarinseinän leikkaus on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Esimerkkikohteen kellarinseinä.

Kohteen yläpohja ja vesikatto (kuva 16) on suurimmaksi osaksi tuulettumaton tasakatto, johon liittyy riskitekijöinä vesikatteen tiiveys ja sisäpuolisen sadevesijärjestelmän toimivuus. Mikäli vesikatto on epätiivis, kosteus pääsee vaurioittamaan myös yläpohjarakenteita, sillä yläpohjarakenteessa ei ole mahdollisuutta tuulettavuuteen. Vesikattomateriaalina on yhdistely bitumikermiä

ja peltiä. Sekakaton liitokset ovat siitä ongelmallisia, että ne saattavat jäädä jo rakennusvaiheessa epätiiviiksi.



Kuva 16. Esimerkkikohteen räystäsrakenne.

Kohteen lähtötiedoista on havaittavissa muitakin ongelmallisia rakenteita kuin vain kosteuteen liittyviä riskejä. Rakennus on liitetty aikaisemmin rakennettuun vanhaan osaan. Uusien ja vanhojen rakennusten liitokset ovat herkkiä vaurioitumaan, sillä niihin ei usein kiinnitetä tarpeeksi huomiota suunnittelu- ja/tai rakennusvaiheessa. Kohteessa on myös monenlaisia rakenneratkaisuja, jolloin kaikkia rakenteita ja niiden erilaisia liitoksia ei välttämättä ole osattu huomioida riittäväällä huolellisuudella. Kohteen alapuolella kulkeva tekniikatunneli on todennäköisesti tuulettamaton ja siellä voi näin ollen esiintyä kosteus- ja mikrobivaurioita. Alapohjassa kosteussulkuna on käytetty ”sitkeää suojapaperia”, joka saattaa sisältää PAH-yhdisteitä. Lähes koko rakennuksen ala- ja välipohjissa pintamateriaalina on muovimatto. Muovimaton liimauksesta on

mahdollista muodostua sisäilmaan VOC-yhdisteitä ja ammoniakkia. Koulussa on käytetty ääneneristykseen akustiikkalevyjä, joista voi päätyä sisäilmaan kuituja.

5.3 Tutkimukset

5.3.1 Sisäilmatutkimus

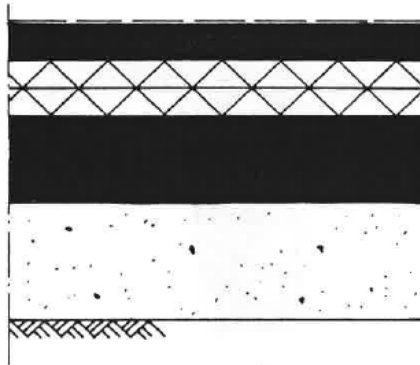
Kohteeseen on tehty sisäilmatutkimus joitakin vuosia sitten. Sisäilmatutkimus päädyttiin tekemään siitä syystä, että käyttäjillä esiintyi oireita. Kohteesta ei tiettävästi ole tehty "virallista" käyttäjäkyselyä, mutta tutkimuksen yhteydessä käyttäjät yhdistivät oireilun etenkin kellariin ja ensimmäiseen kerrokseen.

Tutkimuksessa keskityttiin rakennuksen mahdollisiin kosteus- ja mikrobivaurioihin. Kohteessa tehtiin kosteuskartoitus pintakosteusmittarilla, rakenneavauksia, merkkiainekokeita ja otettiin materiaalinäytteitä. Kosteus- ja mikrobivaurion lisäksi sisäilmaongelman aiheuttajan osatekijänä epäiltiin mineraalivillakuituja IV-kanavan ääneneristeistä, ulkoseinien lämmöneristeistä ja akustiikkalevyistä, sekä säännölliseen siivoukseen kuulumattomia pölymuodostumia. Rakenneavauksissa ei todettu merkittäviä poikkeamia piirrettyjen ja todellisten rakenteiden välillä.

Tutkimusraportissa todettiin yksittäisiä ilmavuotoja yläpohjarakenteissa. Yläpohjan kevytsora -lämmöneristeestä otettiin yksi materiaalinäyte, ja siinä todettiin, ettei eristeessä ole aktiivista mikrobikasvustoa. Raportin toimenpideehdotuksena oli tiivistää ilmavuotokohdat, joita esiintyi eritoten läpivientien ja saumojen kohdalla.

Ulkoseinärakenteista otettiin 27 materiaalinäytettä ja kellarinseinästä 3 näytettä. Ulkoseinässä todettiin olevan järjestelmällisesti ilmavuotoja, ja myös mikrobikasvustoa todettiin osassa näytteistä. Ilmavuotoja tapahtui etenkin ikkunakarmien välistä. Kellarinseinässä todettiin merkittäviä ilmavuotoja, mutta ei aktiivista mikrobikasvustoa. Toimenpideehdotuksena oli epätiivien kohtien tiivistäminen.

Alapohjaan tehtiin 3 rakenneavausta, mutta niistä ei otettu materiaali- tai kosteusnäytteitä. Kahdessa avauksessa huomattiin kuitenkin rakenteen poikkeavan jonkin verran piirustuksiin merkitystä rakennetyypistä kerrospaksuuksien ja suojapaperin osalta (kuva 17). Raportissa esitetyissä tutkimustuloksissa alapohjan rakenteeksi on avauksen perusteella esitetty: pintalaatta, suojapaperi, EPS, kantava laatta ja hiekka. Alapohjan alapuolella olevan maa-aineksen huomattiin myös paikoitellen painuneen muutamia senttimetrejä. Raportissa ei ole mainintaa siitä, onko alapohjan alapuolella oleva maa-aines tuntunut aistinvaraisesti kostealta. Alapohjan toimenpide-ehdotus oli sama kuin muillakin rakenteilla, ilmavuotokohtien tiivistäminen. Tekniikkatunnelin ilman todettiin olevan tunkkaista ja sieltä olevan ilmavuotoja sisäilmaan. Tunnelille ei annettu toimenpide-ehdotuksia.



| | |
|-----------------|--|
| | Pintamateriaali ja -käsittely rak.sel. mukaan |
| 60 mm | Teräsbetonilaatta, tasaisuus BY 8 luokka B-3 - betoni K 30-2 - teräkset 4015 B 500 V levynä |
| | Sitkeä suojapaperi |
| 100 mm | 50 + 50 mm solumuovilevy R Kantava teräsbetonilaatta rakennepiirustuksen mukaan |
| | Sitkeä suojapaperi |
| ≥ 200 mm | Tiivistetty sora |

Kuva 17. Esimerkkikohteen alapohjarakenteessa kapillaarikatkoksi on esitetty tiivistetty sorakerros.

Tutkimusta ei alapohjan osalta ole tehty asianmukaisella huolellisuudella. Rakenneavaukset osoittavat kapillaarikatkossa olevan puutteita, sillä hiekka ei toimi kapillaarikatkomateriaalina. Tämän lisäksi alapohjassa käytetty kaksoisbetonilaattarakenne on kosteus- ja mikrobivaurion kannalta riskialtis. Alapohjan lämmöneristeestä olisi ollut syytä ottaa rakenneavausten yhteydessä materiaalinäyte tai betonilaatasta kosteusmittaus.

Sisäilmatutkimuksessa varsinaista sisäilmaa ei tutkittu ilmanäyttein, vaan rakenteita, jotka saattavat olla ongelman aiheuttajia. Kyseinen tapa on yleinen sisäilmatutkimuksia tehdessä ja ilmanäytteitä harvemmin otetaan. Raportissa pantiin merkille se, että yksittäisiä vinyylilaattoja (muovimatto) oli irronnut alapohjan pintalaatasta. Tässä yhteydessä ei kuitenkaan epäilty kosteuden tai alkalisen kosteuden irrottaneen muovimattoa, jolloin myös VOC-yhdisteet voisivat tulla kyseeseen sisäilmaongelman osatekijänä.

5.3.2 Seurantatutkimus 1

Seurantatutkimuksessa toteutettiin kuitujen ja pölyn pintanäytetutkimukset noin puoli vuotta sisäilmatutkimuksen jälkeen. Kuitututkimus suoritettiin geeliteippimenetelmällä ja pölynäytteet kerättiin pyyhintämenetelmällä muovipussiin. Tutkimuksissa ei havaittu kohonneita kuitu- ja pölyarvoja. Näin ollen hiukkaset, pöly ja kuidut voidaan suhteellisen varmasti rajata pois sisäilmaongelman aiheuttajana.

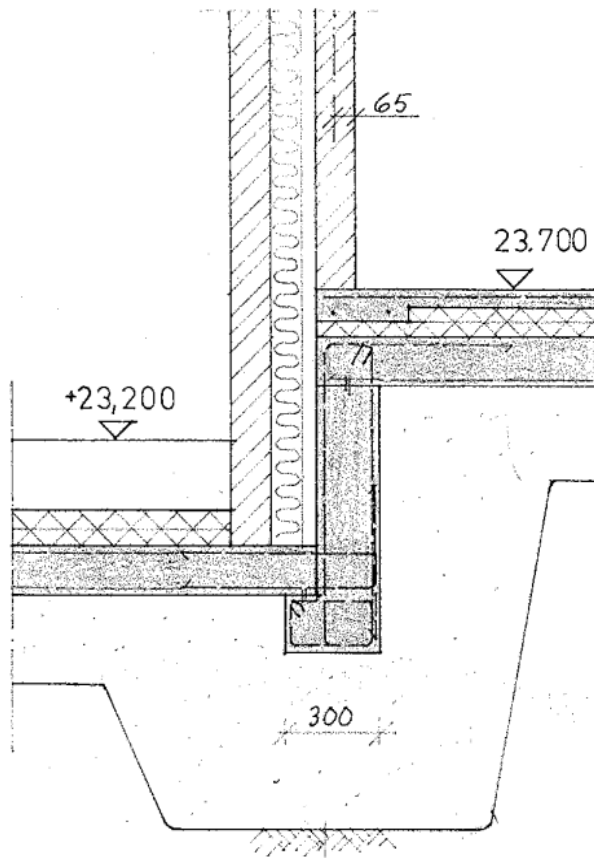
5.3.3 Seurantatutkimus 2

Noin kaksi vuotta sisäilmatutkimuksen jälkeen kohteesta otettiin ilmanäytteitä 6-vaiheimpaktorilla ilman mikrobipitoisuuksien selvittämiseksi. Näytteitä otettiin kahdessa erässä, ensimmäisessä tutkimuksessa 1/3 näytteessä oli poikkeavan paljon mikrobeja. Toisessa ilmanäytetutkimuksessa yhdeksästä näytteestä missään ei havaittu kohonneita mikrobipitoisuuksia.

Ilmanäytteiden tulokset johtivat siihen, että tutkimusta jatkettiin vielä rakenneavauksin, merkkiainekokein ja materiaalinäyttein kellarista ja tilasta, jota ei sisäilmatutkimuksessa kaksi vuotta sitten tutkittu. Sisäilman laadun koettiin kyllä parantuneen aikaisemman sisäilmatutkimuksen ja sen seurauksena tehtyjen korjausten perusteella, mutta yksittäisten käyttäjien oireet siitä huolimatta jatkuivat. Korjaustoimenpiteitä olivat muun muassa rakenteiden tiivistäminen, joidenkin ikkunoiden vaihtaminen ja ilmanvaihdon säätäminen.

Kellarissa ja aikaisemmin tutkimattomassa tilassa havaittiin molempien alapohjissa ilmavuotoja. Molempien tilojen ulkoseinästä ja maanpaineisistä otettiin materiaalinäytteet (molemmista neljä), ja havaittiin 1/4 näytteen sisältävän aktiivista mikrobikasvustoa. Seinissä todettiin myös ilmavuotoja. Toimenpideehdotuksena suositeltiin rakenteiden tiivistämistä ja maanpaineisistä lämmöneristeen uusimista.

Tutkimuksessa huomattiin myös mahdollisesti ongelmallinen väliseinärakenne, joka on osittain maanpinnan alapuolella kuvan 18 mukaisesti. Väliseinärakenteessa havaittiin ilmavuotoja, mutta ei mikrobikasvustoa materiaalinäytteessä.



Kuva 18. Esimerkkikohteen väliseinärakenne, joka on osittain maanpaineseinä.

5.3.4 Ilmanvaihtojärjestelmän kuntotutkimus

Ilmanvaihtojärjestelmän kuntotutkimus toteutettiin kuusi vuotta sisäilmatutkimuksen jälkeen. Tutkimus suoritettiin aistinvaraisesti sekä ilmamäärätutkimuksilla. Kohteessa on koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto. Toimenpide-ehdotuksena raportissa suositeltiin ilmanvaihtokoneiden ja -kanavien uusimista. Ilmanvaihtokone on myös jo ylittänyt laskennallisen teknisen käyttöikänsä (20–30 vuotta).

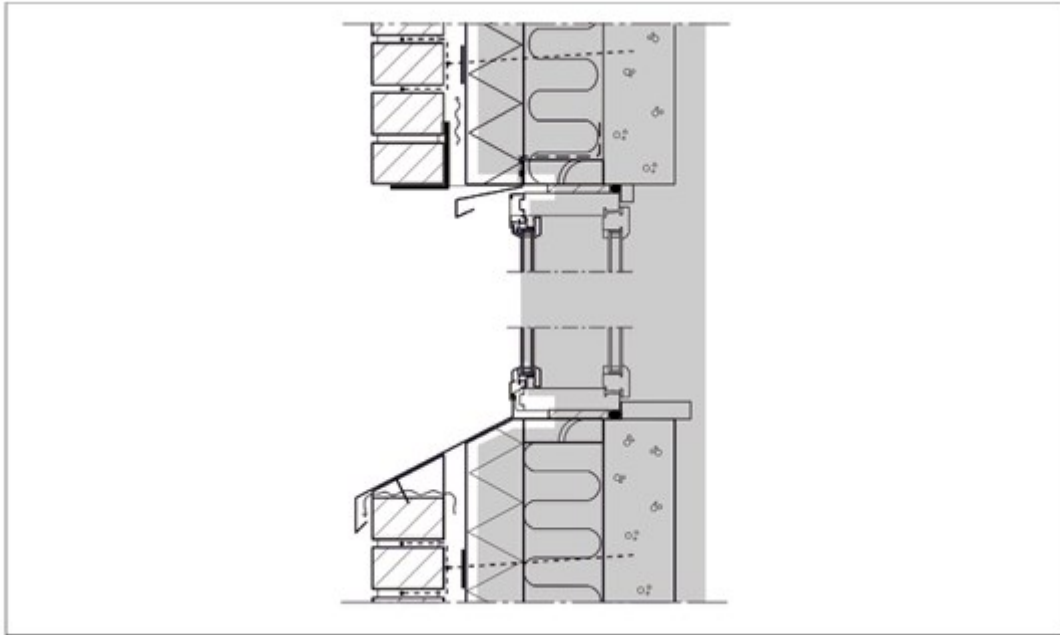
Raportissa todettiin paine-erojen olevan suurimmassa osassa tiloista reilusti ylipaineisia. Liian suuri ylipaine ulkoilmaan nähden aiheuttaa rakenteisiin ylimääräistä kosteusrasitusta ja alipaine taas imee korvausilmaa rakenteista.

Ilmanvaihto pyritään nykyisin säätämään tasapainoon niin, että tilaan tuodaan saman verran ilmaa kuin mitä sieltä poistetaan. Rakenteiden tiiveydellä on myös suuri vaikutus ilmanvaihtoon, etenkin jos tilassa on merkittävä alipaine. Tällöin tilaan tulee puhdasta ilmaa hallittuja reittejä pitkin liian vähän, jolloin ilmaa imeytyy rakenteiden lävitse. Raportissa tutkittiin muun muassa kellari ja tila, jota ei sisäilmatutkimuksessa tutkittu. Kummassakin tilassa todettiin olevan selkeä alipaine, joka selittäisi tiloissa oireilua ja sisäilmaongelman aiheuttajaa.

5.4 Korjauskohdat

Lähtö- ja taustatietojen sekä kuntotutkimuksen perusteella sisäilmaongelman aiheuttajat alkavat selkeytyä. Ongelman todennäköiset aiheuttajat ovat ulkoseinät, kellarinseinät, ilmanvaihto ja mahdollisesti myös osittain maanvastaiset väliseinät, tekniikkatunneli ja alapohja.

Ulko- ja kellarinseinärakenteissa havaittiin ilmavuotoja ja mikrobikasvustoa. Koska aikaisemmin tehdyt tiiviyskorjaukset eivät ole kokonaisvaltaisesti onnistuneet, olisi tässä kohtaa suositeltavaa uusaa julkisivut ja lämmöneristeet kokonaisuudessaan. Mikrobikasvusto ei ole myöskään sallittu ulkoseinän lämmöneristeissä (kuva 19). Kellarinseinän kylmälle puolelle toteutetaan korjauksen yhteydessä veden- ja lämmöneristys.



Kuva 19. Harmaalla pohjalla on esitetty alueet, joissa mikrobikasvusto ei ole sallittu (RIL 250-2020, 117). Mikrobikasvusto on kuitenkin siinä kohtaa hyväksyttävää, jos epäpuhtaudet eivät pääse eristeistä sisäilmaan.

Ilmanvaihtojärjestelmä suositellaan uusittavaksi IV-tutkimuksen mukaisin ehdotuksin. Tällöin IV-järjestelmä mitoitetaan oikein ja asennetaan tasapainoon, jolloin tilojen korvausilma ei tule rakenteista.

Osittain maanvastaisissa väliseinissä havaittiin ilmavuotoja, mutta ei mikrobikasvustoa. Väliseinät ovat kuitenkin riskialttiita kosteus- ja mikrobivaurioitumaan, sillä niitä ei ole veden- tai lämmöneristetty. Väliseinät olisi suositeltava vähintäänkin tiivistää.

Tekniikkatunnelista havaittiin runsaita ilmavuotoja eri tiloihin. Seurantatutkimuksissa ei kerrota oliko ilmavuotokohtien tiivistäminen riittävä korjaustoimenpide ilmavuotojen poistamiseksi. Mikäli tiivistykset eivät ole riittäviä, tekniikkatunnelista on suositeltava rakentaa tuulettuva.

Kohteen alapohjassa on tutkimuksissa havaittu ilmavuotoja. Alipaineinen ilmanvaihto on vielä lisännyt alapohjasta ja muista rakenteista sisäilmaan tulevaa epäpuhdasta ilmaa. Alapohjasta ei otettu missään tutkimuksessa

kosteusmittausta tai materiaalinäytettä. Maanvastainen alapohja on riskialtis kosteudelle ja mikrobeille puutteellisen kapillaarikatkon ja kaksoisbetonilaattarakenteen takia. Salaojien toimivuutta ei ole myöskään tutkittu. Alapohjaan olisi suositeltavaa tehdä vielä kosteus- ja mikrobitutkimukset ja tutkimusten pohjalta joko tiivistää rakenne tai tehdä siihen laajempi korjaus.

Muita epäiltyjä epäpuhtauksia käsiteltiin tutkimuksissa jonkin verran. Hiukkaset, pöly ja kuidut eivät todennäköisesti aiheuta ongelmaa, sillä pintanäytteet todettiin puhtaksi. Kohteesta ei otettu VOC-näytteitä, joten sisäilmaongelmaa rakennuksessa voi aiheuttaa myös muovimatto, jolla on päällystetty rakennuksen lähes kaikki lattiapinnat.

6 Yhteenveto

Sisäilmaongelmaan vaikuttaa monet tekijät, kuten opinnäytetyössä on aiemmin todettu. Ongelman aiheuttaja löytyy useimmiten rakenteellisista ratkaisuista ja puutteellisesta ilmanvaihdosta. Kuitenkin myös ihmisellä itsellään on vaikutusta laadukkaan sisäilma ylläpitämiseksi. Pätevä asiantuntija tai korjaussuunnittelija osaa ratkaista ongelman aiheuttajat lähtötietojen ja riittävien tutkimusten avulla. Jossakin tapauksissa rakennuksen sisäilmaongelmat ovat niin laajamittaisia, että kustannustehokkaampaa on rakennuksen purkaminen.

Kun sisäilmaongelmaa epäillään, on muutoksiin ja korjauksiin ideaalista lähteä toteuttamalla ensin ne muutokset, mitkä ovat helpoiten ja edullisimmin toteutettavissa. Ensin voi kiinnittää huomiota käyttäjien aiheuttamiin epäpuhtauksiin ja säännölliseen puhtaanapitoon, vaikka ongelman syyt ovatkin todennäköisimmin muualla. Tämän jälkeen on aiheellista kääntyä asiantuntijoiden puoleen sisäilmaongelman aiheuttajan ratkaisemiseksi.

Lähtötietojen ja tutkimusten avulla puutteita löydetään yleensä ilmavaihdosta, rakenteista ja rakennusmateriaaleista. Ilmanvaihdon rooli sisäilmaongelmassa on merkittävä ja pelkkä ilmanvaihtojärjestelmän tasapainottaminen, korjaaminen tai uusiminen voi poistaa koko sisäilmaongelman. Rakennuksessa voi olla myös useita rakenteellisia riskitekijöitä (liitteet 2 ja 3), jotka jollakin tavalla vaikuttavat sisäilmaan negatiivisesti. Rakenteellisten tekijöiden korjaustarve ja -toimenpiteet määritellään kohdekohtaisesti.

Tämänhetkisen tiedon mukaan oireilua aiheuttavien sisäilmaongelmien tekijöitä ovat ammoniakki, formaldehydi, hiukkaset, pöly ja kuidut, PAH-yhdisteet, styreeni, VOC-yhdisteet sekä mikrobit. Kyseisten epäpuhtauksien sijainnista rakenteissa on olemassa suhteellisen hyvä käsitys ja niille on myös erilaisia näytteenottotapoja. Rakennusalan kehittyessä, voi tulevaisuudessa käydä ilmi uusia epäpuhtaustekijöitä, jotka aiheuttavat käyttäjilleen oireita ja tätä myötä uudenlaisia sisäilmaongelmia.

Lähteet

Airaksinen, R.; Salmela, A. & Pitkäranta, M. 2023. Kivihiilitervatuotteet asuinrakennuksissa. Tutkimuksesta tiiviisti 29/2023. Helsinki: Terveyden ja hyvinvoinnin laitos.

https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/146757/URN_ISBN_978-952-408-108-5.pdf?sequence=1.

Arkkitehtimuseo 2023a. 1800-luvun loppu ja 1900-luvun ensimmäinen vuosikymmen. Viitattu 11.10.2023.

<https://www.mfa.fi/kokoelmat/tietopaketit/koulurakentamisen-historiaa/1800-luvun-loppu-ja-1900-luvun-ensimmainen-vuosikymmen/>.

Arkkitehtimuseo 2023b. 1910- ja 1920-luvut. Viitattu 11.10.2023.

<https://www.mfa.fi/kokoelmat/tietopaketit/koulurakentamisen-historiaa/1910-ja-1920-luvut/>.

Arkkitehtimuseo 2023c. 1930- ja 1940-luvut. Viitattu 11.10.2023.

<https://www.mfa.fi/kokoelmat/tietopaketit/koulurakentamisen-historiaa/1930-ja-1940-luvut/>.

Arkkitehtimuseo 2023d. 1950- ja 1960-luvut. Viitattu 11.10.2023.

<https://www.mfa.fi/kokoelmat/tietopaketit/koulurakentamisen-historiaa/1950-ja-1960-luvut/>.

Arkkitehtimuseo 2023e. 1970-luku. Viitattu 11.10.2023.

<https://www.mfa.fi/kokoelmat/tietopaketit/koulurakentamisen-historiaa/1970-luku/>.

Asbesti.info 2017. PCB? Onko se vaarallista? Missä sitä on. Viitattu 13.9.2023.

<https://www.asbesti.info/post/2017/09/29/pcb-onko-se-vaarallista-miss-c3-a4-sit-c3-a4-on>.

Asuinrakennukset 2023. Kreosootti rakennuksissa. Viitattu 13.9.2023.

<https://www.asuinrakennukset.fi/rakenteet/kreosootti-rakennuksissa/>.

Asumisterveysohje 2003. Asuntojen ja muiden oleskelutilojen fysikaaliset, kemialliset ja mikrobiologiset tekijät. Helsinki: Sosiaali- ja terveysministeriö.

Betoni 2023. Miten betoni tuli Suomeen. Viitattu 17.10.2023.

<https://betoni.com/tietoa-betonista/betonin-historia/miten-betoni-tuli-suomeen/>.

Betonitieto 2023a. Rakennejärjestelmän valinta. Viitattu 18.10.2023.

<https://www.betonitieto.fi/suunnittelijat/betonirakenteiden-suunnittelu-talonrakentaminen/betonirakenteiden-luonnos-ja-konseptisuunnittelu/rakennejarjestelman-valinta.html>.

Betonitieto 2023b. Runkorakenteet. Viitattu 17.10.2023.

<https://www.betonitieto.fi/suunnittelijat/arkkitehdit/runkorakenteet.html>.

Duodecim Terveyskirjasto 2023. Ovatko PCB-aineet supermyrkkyyä. Viitattu 13.9.2023. <https://www.terveyskirjasto.fi/asy00216>.

Elementtisuunnittelu 2020. Toimisto- ja liikerakennukset. Viitattu 17.10.2023.

<https://www.elementtisuunnittelu.fi/rakennejarjestelmat/toimisto-ja-liikerakennukset>.

Helsingin seudun ympäristöpalvelut 2023. Ilmansaasteiden terveyshaitat.

Viitattu 13.9.2023. <https://www.hsy.fi/ilmanlaatu-ja-ilmasto/ilmansaasteiden-terveyshaitat/>.

Hengitysliitto 2023a. Ilmanvaihtojärjestelmät. Viitattu 8.9.2023.

<https://www.hengitysliitto.fi/kodin-sisailma-ja-kunnossapito/ilmanvaihto/ilmanvaihtojarjestelmat/>.

Hengitysliitto 2023b. Ilmanvaihto. Viitattu 8.9.2023.

<https://www.hengitysliitto.fi/kodin-sisailma-ja-kunnossapito/ilmanvaihto/>.

Hengitysliitto 2023c. Pienhiukkaset. Viitattu 13.9.2023.

<https://www.hengitysliitto.fi/elamanlaatu-ja-hyvinvointi/saa-ja-ilmanlaatu/pienhiukkaset/>.

Hengitysliitto 2023d. Sisäilman epäpuhtaudet ja hajut. Viitattu 13.9.2023.

<https://www.hengitysliitto.fi/kodin-sisailma-ja-kunnossapito/sisailmanlaatu/sisailman-epapuhtaudet-ja-hajut/#>.

Hengitysliitto 2023e. Sisäilmatutkimukset. Viitattu 29.9.2023.

<https://www.hengitysliitto.fi/kodin-sisailma-ja-kunnossapito/sisailmaongelmien-selvittaminen/sisailmatutkimukset/>.

- Hometalo.fi 2023. Mikrobit. Viitattu 15.9.2023.
<https://www.hometalo.fi/hometalon-tutkiminen/mikrobit/>.
- Hytönen, Y & Seppänen, M. 2009. Tehdään elementeistä - Suomalaisen betonielementtirakentamisen historia. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
- Karttunen, H.; Koistinen, J.; Saltikoff, E. & Manner, O. 2008. Ilmakehä, sää ja ilmasto. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy.
- KH 90-00394. 2007. Kuntotarkastus asuntokaupan yhteydessä. Ohjekortti. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- Komulainen, J.; Huttunen J. & Sääntti J. 2011. Haitalliset aineet rakennuksissa ja niiden hallinta. Rakennustieto: Rakentajan kalenteri 2011.
- Leivo, V; Sarlin, E; Suonketo, J; Pikkuvirta, J & Pentti, M. 2019. Muovipäälysteisten lattioiden vaurioituminen kosteuden vaikutuksesta. Vaasa: Sisäilmastoseminaari 2019.
https://www.sisailmauutiset.fi/Sisailmastoseminaari_2019.pdf.
- Loopshore 2023a. Case: Sisäilman mikrobimääritys Andersen-menetelmällä. Viitattu 4.10.2023. <https://loopshore.com/case-sisailman-mikrobimaaritys-andersen-menetelmalla/>.
- Loopshore 2023b. Olosuhdemittaus. Viitattu 4.10.2023.
<https://loopshore.com/loop-one-palvelumme/>.
- Merikallio, T. 2000. Kosteusmittaus. Rakennustieto: Rakentajan kalenteri 2000.
- Puuinfo 2020. Puun kosteuskäyttäytyminen. Viitattu 20.10.2023.
<https://puuinfo.fi/suunnittelu/ohjeet/tekniset-tiedotteet/puun-kosteuskayttaytyminen/>.
- Rakennuslehti 2017. Kosteudenhallintakoulutus halutaan pakolliseksi työmaille. Viitattu 20.9.2023.
<https://www.rakennuslehti.fi/2017/10/kosteudenhallintakoulutus-halutaan-pakolliseksi-tyomaille/>.
- RIL 250-2020. Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RT 103333. 2021. Betonin suhteellisen kosteuden mittaaminen. Ohjekortti. Helsinki: Rakennustieto Oy.

RT 14-10775. 2003. Sisäilman ammoniakkipitoisuuden määrittäminen. Ohjekortti. Helsinki: Rakennustieto Oy.

RT 14-11197. 2015. Rakenteiden ilmatiiveyden tarkastelu merkkiainekokein. Ohjekortti. Helsinki: Rakennustieto Oy.

RT 14-11239. 2016. Rakennuksen lämpökuvaus. Ohjekortti. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Sisäilmayhdistys ry 2023a. Ilmavirtaus ja paine-ero. Viitattu 10.10.2023. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Ongelmien-tutkiminen/Rakennustekniset-tutkimukset/Ilmavirtaus-ja-paine-ero>.

Sisäilmayhdistys ry 2023b. Kemialliset epäpuhtaudet. Viitattu 8.9.2023. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Sisailmasto/Kemialliset-epapuhtaudet>.

Sisäilmayhdistys ry 2023c. Kosteuden siirtyminen. Viitattu 20.9.2023. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekninen-toiminta/Kosteuden-siirtyminen>.

Sisäilmayhdistys ry 2023d. Kosteusmittaukset. Viitattu 6.10.2023. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Ongelmien-tutkiminen/Rakennustekniset-tutkimukset/Kosteusmittaukset>.

Sisäilmayhdistys ry 2023e. Kosteusvaurioitumisen yleisperiaate. Viitattu 15.9.2023. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteusvaurioituminen/Kosteusvaurioitumisen-yleisperiaate>.

Sisäilmayhdistys ry 2023f. Mikrobin terveyshaitat. Viitattu 15.9.2023. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Terveysvaikutukset/Mikrobin-terveyshaitat>.

Sisäilmayhdistys ry 2023g. Mikrobikasvuston edellytykset. Viitattu 15.9.2023. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Mikrobit/Mikrobikasvun-edellytykset>.

Sisäilmayhdistys ry 2023h. Rakenteiden avaukset. Viitattu 4.10.2023.

<https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Ongelmien-tutkiminen/Rakennustekniset-tutkimukset/Rakenteiden-avaukset>.

Sisäilmayhdistys ry 2023i. Sisäilman tekijät. Viitattu 25.7.2023.

<https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Sisailmasto/Sisailman-tekijat>.

Sundberg, E. 2016. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Ilmastointitekniikka osa 1. Toinen painos. Forssa: Talotekniikka-Julkaisut Oy.

Säteilyturvakeskus 2023a. Radon Suomessa. Viitattu 13.9.2023.

<https://stuk.fi/radon-suomessa>.

Säteilyturvakeskus 2023b. Radon uudisrakentamisessa. Viitattu 13.9.2023.

<https://stuk.fi/radon-uudisrakentamisessa>.

Säteilyturvakeskus 2023c. Radonin mittaaminen. Viitattu 29.9.2023.

<https://stuk.fi/radonin-mittaaminen>.

Tampereen yliopisto 2023. Suomalainen homemalli. Viitattu 19.10.2023.

<https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/suomalainen-homemalli/>.

Terveet tilat 2028. 2023a. 1800-luvun massiivitiilirakennus. Valtioneuvosto.

Viitattu 11.10.2023. <https://tilatjaterveys.fi/rakennukset#/1800-luvun-massiivitiilirakennus/katunakyma>.

Terveet tilat 2028. 2023b. 1880–1920-lukujen hirsirakennus. Valtioneuvosto.

Viitattu 11.10.2023. <https://tilatjaterveys.fi/rakennukset#/1880-1920-lukujen-hirsirakennus/katunakyma>.

Terveet tilat 2028. 2023c. 1920–1930-lukujen massiivitiilirakennus.

Valtioneuvosto. Viitattu 11.10.2023. <https://tilatjaterveys.fi/rakennukset#/1920-1930-lukujen-massiivitiilirakennus/katunakyma>.

Terveet tilat 2028. 2023d. 1950–1960-lukujen tiiliverhoiltu betonirakennus.

Valtioneuvosto. Viitattu 11.10.2023. <https://tilatjaterveys.fi/rakennukset#/1950-1960-lukujen-tiiliverhoiltu-betonirakennus/katunakyma>.

Terveet tilat 2028. 2023e. 1970–1980-lukujen elementtirakennus.

Valtioneuvosto. Viitattu 11.10.2023. <https://tilatjaterveys.fi/rakennukset#/1970-1980-lukujen-elementtirakennus/katunakyma>.

Terveet tilat 2028. 2023f. 1990–2000-lukujen hybridirakennus. Valtioneuvosto. Viitattu 11.10.2023. <https://tilatjaterveys.fi/rakennukset#/1990-2000-lukujen-hybridirakennus/katunakyma>.

Terveiden ja hyvinvoinnin laitos 2023a. Ilmansaasteet. Viitattu 13.9.2023. <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/ilmansaasteet>.

Terveiden ja hyvinvoinnin laitos 2023b. Miten voin ylläpitää sisäilman laatua. Viitattu 1.8.2023. <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/sisailma/miten-voin-yllapitaa-sisailman-laatua->.

Terveiden ja hyvinvoinnin laitos 2023c. Radon. Viitattu 13.9.2023. <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/vesi/kaivovesi/kaivoveden-kemiallinen-laatu/kaivovedessa-luonnostaan-esiintyvät-kemialliset-aineet/radon>.

Tuomisto, J; Vartiainen, T & Tuomisto, J. 2011. Dioksiinit ja PCB-yhdisteet: synopsis. Helsinki: Terveiden ja hyvinvoinnin laitos. <https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/79884/ab0100ce-2e1f-4cac-9ac3-84eaf5b05b63.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Työterveyslaitos 2023a. 1. Yleistä sisäilmasta. Viitattu 20.6.2023. <https://www.ttl.fi/oppimateriaalit/sisailma-tyopaikalla/1-yleista-sisailmasta>.

Työterveyslaitos 2023b. Formaldehydi. Viitattu 8.9.2023. <https://www.ttl.fi/teemat/tyoturvaluisuus/altistuminen-tyoympariston-haittatekijoille/kemiallisten-tekijoiden-hallinta-tyopaikalla/kemikaalit-ja-tyo-altistumistietosivusto/formaldehydi>.

Työterveyslaitos 2023c. Styreeni. Viitattu 13.9.2023. <https://www.ttl.fi/teemat/tyoturvaluisuus/altistuminen-tyoympariston-haittatekijoille/kemiallisten-tekijoiden-hallinta-tyopaikalla/kemikaalit-ja-tyo-altistumistietosivusto/styreeni>.

Työterveyslaitos 2023d. Näytteenotto-ohjeet. Viitattu 29.9.2023. <https://www.ttl.fi/palvelut/laboratoriopalvelut/naytteenotto-ohjeet?ss=&category=1063>.

Vinha, J.; Laukkarinen, A.; Mäkitalo, M.; Nurmi, S.; Huttunen, P.; Pakkanen, T.; Kero, P.; Manelius, E.; Lahdensivu, J.; Köliö, A.; Lähdesmäki, K.; Piironen, J.; Kuhno, V.; Pirinen, M.; Aaltonen, A.; Suonketo, J.; Jokisalo, J.; Teriö, O.; Koskenvesa, A. & Palolahti, T. 2013. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen

lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiakoulutuksessa. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.

Yle MOT 2021. Myrkyllinen kotini: käsikirjoitus. Viitattu 13.9.2023.
<https://yle.fi/aihe/artikkeli/2021/01/18/myrkyllinen-kotini-kasikirjoitus>.

Ympäristöopas 2016. Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Helsinki: Ympäristöministeriö.
https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/75517/YO_2016_Kuntotutkimusopas.pdf.

Ympäristöopas 28. 1997. Kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen kuntotutkimus. Helsinki: Ympäristöministeriö.