

Riku Paavilainen

PUISEN ELEMENTTISEINÄN LIITOSTEN TOTEUTUSOHJE

Kandidaatintyö
Rakentamisen tiedekunta
Eero Tuominen
4/2022

TIIVISTELMÄ

Riku Paavilainen: Puisen elementtiseinän liitosten toteutusohje
Directions for wooden element wall joint execution
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2022

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on selvittää puurakenteiselle elementtiseinälle merkittävimmät rakennusfysikaaliset ilmiöt ja antaa nykyaikaisia toteutusohjeita puisten elementtiseinien yleisimmille liitoksille. Toteutusohjeiden löytämiseksi työssä käydään läpi valmiita yhdistystason malliratkaisuja ja tutkimuksissa tutkittuja ratkaisuja puurakenteisille alapohja-, välipohja-, yläpohja-, ulkonurkka- ja sisänurkkaliitoksille. Lisäksi työssä tuotetaan detaljikuvia tarkastelussa olevalle elementtirakenteelle.

Tutkimuksen alussa selvitetään puuelementtiseinälle merkittävimpiä rakennusfysikaalisia ilmiöitä, kuten kuinka kosteus ja lämpö siirtyvät rakenteessa. Kosteus kulkeutuu rakenteisiin erilaisien ilmiöiden, kuten kapillaarisuuden, vesihöyryn diffuusion ja sen konvektion avulla. Kapillaarisesti kosteus kulkeutuu rakenteisiin rakennusmateriaalien huokosverkostoja pitkin pintajännityksen avulla. Kapillaarisen kosteuden siirtymisen yhteydessä tarkasteltiin huokoisten materiaalien hygroskooppisuutta ja tasapainokosteutta. Vesihöyrypitoisuuksien epätasapaino puolestaan aiheuttaa vesihöyryn diffuusiiovirran, joka oikeissa olosuhteissa mahdollistaa kosteuden kondensoituminen rakenteen sisälle. Monille rakenteille, kuten yläpohjalle, erittäin merkittäväksi tekijäksi osoittautui vesihöyryn konvektiovirta, joka syntyy lämpötila- ja paine-erojen seurauksena. Paineerojen aiheuttajiksi nimettiin rakennuksen ilmastointi, tuuli ja rakennuksen sisäilman savupiippuvaikutus.

Tutkimuksessa nimettiin lämmön siirtymistavoiksi konvektio, johtuminen ja säteily. Johtumisen yhteydessä esiin nousivat rakenteisiin syntyvät kylmäsilat. Säteilyn havaittiin tuottavan rakennukselle lämpökuormaa, mutta sillä ei ollut merkittävää vaikutusta elementtien liitoksiin.

Seuraavaksi tutkimuksessa käytiin läpi yhdistystason malliratkaisuja ja tutkimuksissa tutkittuja ratkaisuja eri liitoksiin. Näitä läpikäytäessä esiin nousi erityisiä riskikohtia eri liitoksille. Läpikäynnin aikana nostettiin esiin eri liitoksille kohdistuvia riskejä.

Alapohjaliitoksen tapauksessa merkittäväksi osoittautui alaohjauspuun kosteustekninen toiminta, jota voitiin parantaa lämmöneristyksellä. Lämmöneristyksen parannuskeinoiksi nimettiin lämpöä eristävä tuulensuoja, perusmuurin ulkopuolinen lämmöneristämien ja solumuovikaistan käyttö alaohjauspuun alla kapillaarikatkona.

Välipohjaliitoksessa havaittiin oleellinen kondenssiriski, johon voidaan vaikuttaa esimerkiksi välipohjan kannatustavan valinnalla. Yleiseksi ohjeeksi välipohjaliitokseen voidaan sanoa, että höyryn- ja ilmansulkukerrokset tulee viedä mahdollisimman lähellä rakenteen lämmintä pintaa.

Yläpohjalle merkittävimmät riskit loi kosteuden konvektio, jonka vuoksi tutkimuksessa perehdyttiin ilmansulkukalvon tiivyyteen yläpohjaliitoksessa. Tutkimuksessa esitettiin kaksi tapaa, joilla ilmansulkukalvot voidaan tiivistää yläpohjaliitoksessa.

Ulko- ja sisänurkkien osalta tarkasteltiin laskennallista diplomityötutkimusta, jossa ei löydetty tulevaisuuden ilmastossa toimivia ratkaisuja ulkoseinäelementtien runkorankojen sijoittelulle. Nurkkaliitosten toteutukselle kyettiin antamaan tästä huolimatta yleispäteviä ohjeita, jotka pohjautuivat Tampereen yliopiston seminaarijulkaisuun.

Tutkimuksen lopussa toteutettiin tarkasteltavalle elementtiseinärakenteelle liitosdetaljit pohjautuen aiemmin tarkasteltuihin liitosratkaisuihin. Tuotettujen kuvien toimivuuteen epävarmuutta tuo kuitenkin tarkastelussa olevan seinärakenteen ja aiemmin tutkimuksessa tarkasteltujen rakenteiden kosteusteknisen käyttäytymisen erot. Lisäksi niissä ei otettu kantaa muun muassa paloturvallisuuteen, kantavuuteen tai jäykistykseen.

Avainsanat: rakennusfysiikka, konvektio, paine-erot, kapillaarisuus, diffuusio, kondensoituminen, kylmäsilta, elementtiliitos, alapohjaliitos, välipohjaliitos, yläpohjaliitos, nurkkaliitos

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Puun käyttö rakennusmateriaalina	1
1.2 Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja toteuttaminen	1
1.3 Tutkimuksen tarkoitus ja rakenne	2
2. ULKOSEINÄLLE MERKITTÄVÄT RAKENNUSFYSIKAALISET ILMIÖT	3
2.1 Konvektio ja paine-erot	3
2.2 Kosteus rakenteessa	5
2.2.1 Ilman vesihöyrypitoisuus ja suhteellinen kosteus	6
2.2.2 Hygroskooppisuus ja kapillaarisuus	7
2.2.3 Vesihöyryn diffuusio	8
2.3 Lämmön siirtyminen rakenteessa	9
2.3.1 Johtuminen ja kylmäsilat	9
2.3.2 Lämpösäteily	11
3. PUURAKENTEIDEN LIITOSTEN TOTEUTUSOHJEITA	13
3.1 Tarkasteltavan ulkoseinän rakenne	13
3.2 Ulkoseinä-alapohjaliitos	16
3.3 Ulkoseinä- välipohjaliitos	18
3.4 Ulkoseinä-yläpohjaliitos	20
3.5 Ulkoseinien ulko- ja sisänurkka	22
4. TARKASTELTAVAN RAKENTEEN LIITOKSET	25
4.1 Alapohjan liitosdetalji	25
4.2 Välipohjan liitosdetalji	26
4.3 Yläpohjan liitosdetalji	27
4.4 Nurkkien liitosdetaljit	28
4.4.1 Ulkonurkka	28
4.4.2 Sisänurkka	29
5. YHTEENVETO	31
LÄHTEET	33

1. JOHDANTO

1.1 Puun käyttö rakennusmateriaalina

Rakentamisessa on alettu kiinnittää entistä enemmän huomiota sen aiheuttamaan hiilijalanjälkeen. Vuonna 2020 rakentaminen ja rakennukset synnyttivät 37 % globaaleista hiilipäästöistä, joista 10 % aiheutuu rakennusmateriaaleista (United Nation Environment Programme 2021). Näihin päästöihin voidaan vaikuttaa rakennevalinnoilla, kuten puurungon valitsemisella betonirungon sijaan. Puurunkoiset vaihtoehdot ovat puu- ja betonirunkoisien kerrostalon hiilijalanjälkivertailussa ylivoimaisia otettaessa huomioon puun biogeeniset hiilivarastot (Viljakainen & Lahtela 2019, s. 27). Lisäksi muitakin rakenneosia voidaan korvata markkinoille tulleilla hiilineutraaleimmilla tuotteilla. Esimerkiksi perinteisesti puurankaseinässä käytetty mineraalivilla voidaan korvata puupohjaisilla eristeillä. Puupohjaisten eristeiden kosteusturvallista toimintaa onkin tutkittu muun muassa Tampereen yliopiston Ecosafe-hankkeessa, jossa löytyi kosteusteknisesti toimivia rakennemalleja (Forrs 2020, s. 110).

Puurakentamisessa elementtirakentaminen on yleistä. Elementtirakentamisesta puhuttaessa voidaan olettaa, että elementit toteutetaan hyvin hallituissa olosuhteissa, jolloin tavallisen seinäpinnan toteuttaminen on vaivatonta. Rakennusfysiikan kannalta haasteellisimpia kohtia seinärakenteessa ovatkin esimerkiksi elementtiliitoksien, läpivientien, ikkunoiden ja ovien toteuttaminen.

1.2 Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja toteuttaminen

Rakennusfysikaalisen suunnittelun lähtökohtana ovat Suomen lait ja asetukset. Suomen laeissa otetaan kantaa esimerkiksi rakennuksen terveellisyyteen, energiatehokkuuteen sekä rakenteiden lujuuteen että vakauteen. Nämä asiat kytkeytyvät suoraan rakennusfysikaalisen suunnittelun tavoitteisiin, kuten ilmatiiveyteen, toimivaan kosteustekniseen toimintaan ja hyvään lämmöneristävyyteen.

Rakennushakkeet voivat olla hyvin erilaisia. Rakennusten tulevat olosuhteet vaihtelevat, ja niiden suunnittelun vaativuusasteet voivat poiketa toisistaan. Rakennesuunnittelijan tulee ottaa huomioon jokaisen rakennushankkeen erityispiirteet liitoksia suunnitellessaan ja soveltaa rakennusfysikaalisesti toimivia rakennemalleja niihin. Rakennesuunnitteluun on tarjolla yhdistystason valmiita rakennemalleja, joiden tarkoituksena on ohjata suunnittelua yksinkertaisiin ja toimiviin ratkaisuihin.

1.3 Tutkimuksen tarkoitus ja rakenne

Tutkimuksessa esitellään puisille rakenteille merkittävimpiä rakennusfysikaalisia ilmiöitä. Tutkimuksen tarkoituksena on kuitenkin löytää nykyaikaisia ja rakennusfysikaalisesti toimivia toteutusohjeita puisen ulkoseinäelementin yleisimmille liitoksille.

Tutkimuksessa käsiteltäviä tutkimuskysymyksiä ovat: Mitkä ovat puurakenteille merkittävimpiä rakennusfysikaalisia ilmiöitä? Mitä rakennusfysikaalisia riskejä eri elementtiliitoksille syntyy? Kuinka nämä riskit voidaan torjua rakenteellisilla ratkaisulla ja valinnoilla? Näihin kysymyksiin etsitään vastaukset kirjallisuustutkimuksena.

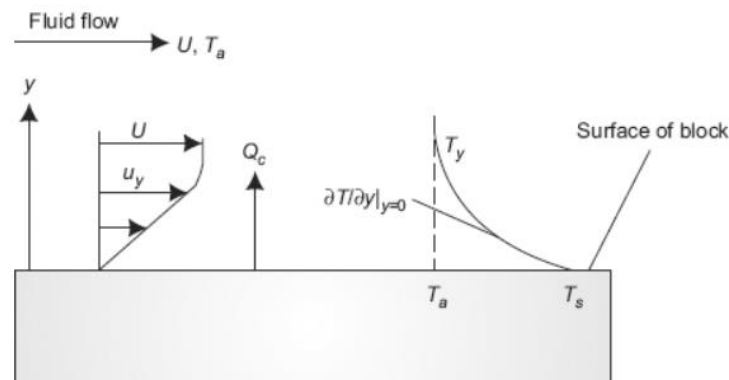
Rakennusfysikaaliset ilmiöt esitellään luvussa 2. Luvussa 3 esitellään aiemmissa tutkimuksissa selvitettyjä toteutusratkaisuja sekä yhdistystason malliratkaisuja elementtiliitoksille. Tarkasteltavia elementtiliitoksia ovat alapohja-, välipohja-, yläpohja- ja ulkoseinien nurkkaliitokset. Luvussa 4 sovelletaan luvussa 3 saatuja toteutusohjeita nykyisen puurakentamistrendin innovoimaan, mutta vielä kehitteillä olevaan puuelementtiseinä-rakenteeseen. Tämä rakenne koostuu ulkoverhouspaneelistä, ilmaaraosta, mineraalivillaisesta tuulensuojasta, sahanpuru- ja kutterinlastueristeestä, ilmansulkupaperista ja vanerista.

2. ULKOSEINÄLLE MERKITTÄVÄT RAKENNUS-FYSIKAALISET ILMIÖT

Rakennus altistuu sijainnistaan riippuen erilaisille sääolosuhteille. Tarkemmin voidaan sanoa jopa rakennusosien altistuvan erilaisille sääolosuhteille. Erilaiset olosuhteet aiheuttavat rakennusfysikaalisia ilmiöitä, joita on avattu tässä luvussa.

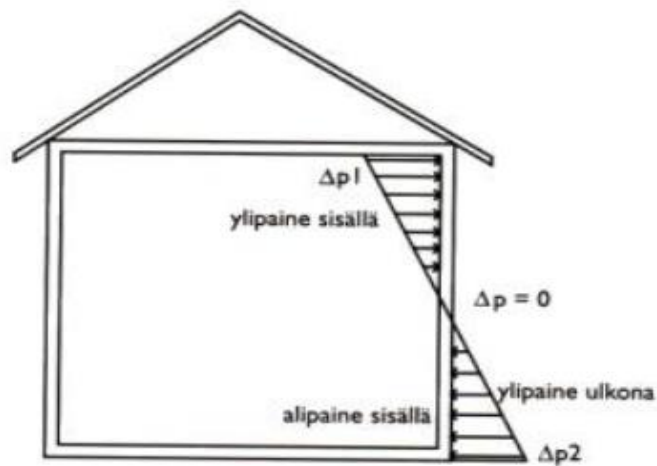
2.1 Konvektio ja paine-erot

Konvektio on energian tai aineen kulkeutumista välittäjäaineen liikkeen seurauksena. Yleensä rakennusfysiikassa välittäjäaineena toimii ilma, mutta joskus myös vesi voi toimia välittäjäaineena (Hagentoft 2001, s. 4). Thirumaleswarin (2006) mukaan konvektio voi johtua lämpötilaerojen aiheuttamasta tiheyserosta, jolloin puhutaan luonnollisesta konvektiosta. Konvektiota voivat aiheuttaa myös ulkoiset tekijät, kuten tuuli tai puhallin, jolloin kyseessä on pakotettu konvektio. Se on luonnollista konvektiota voimakkaampaa. (Thirumaleswar 2006) Kuvassa 1 on esitetty pakotetun laminaarisen konvektion nopeuden muutoksen vaikutus lämpötilaan.



Kuva 1. Pakotettu laminaarinen konvektio kuuman pinnan yli (Thirumaleswar 2006).

Ilman lämpötilojen ero sisä- ja ulkoilmassa aiheuttaa epätasapainon, joka johtaa rakennuksen pystysuuntaisiin paine-eroihin (Hagentoft 2001, s. 75), jota kutsutaan savupiippuvaikutukseksi. Sisällä lämpenevä sisäilma alkaa kohota rakennuksen yläosiin aiheuttaen ylipaineen. Alhaalta kohoamaan alkanut ilma aiheuttaa rakennuksen alaosiin alipaineen. Rakennuksen keskiosiin syntyy niin sanottu neutraaliakseli, jonka korkeudella rakennuksen sisä- ja ulkopuolinen paine ovat tasapainossa (Hagentoft 2001, s. 75). Kuva 2 havainnollistaa ilmiön vaikutusta.

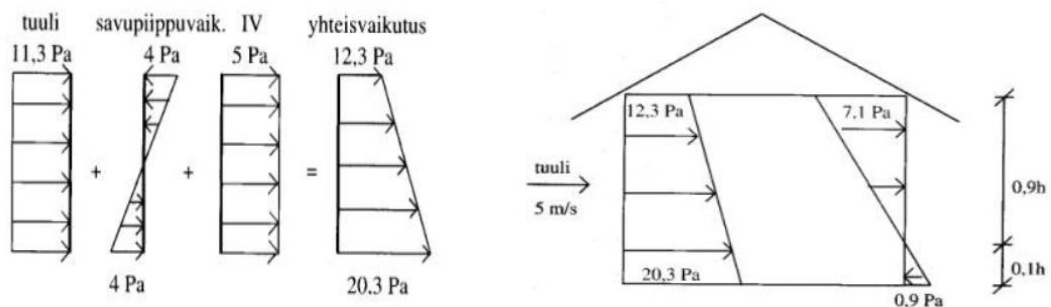


Kuva 2. Rakennuksen paine-erot (Sisäilmäyhdistys ry 2008)

Kuvassa 2 ei ole kuvitettu alapohjaan syntyvää imua eikä yläpohjaan syntyvää painetta, mutta siitä nähdään, että suurimmat konvektion riskit tiiviissä rakenteessa syntyvät alaja yläpohjaliitoksiin. Rakennuksen paine-erot kasvavat rakennuksen vapaan tilan korkeuden kasvaessa (Sisäilmäyhdistys ry 2008).

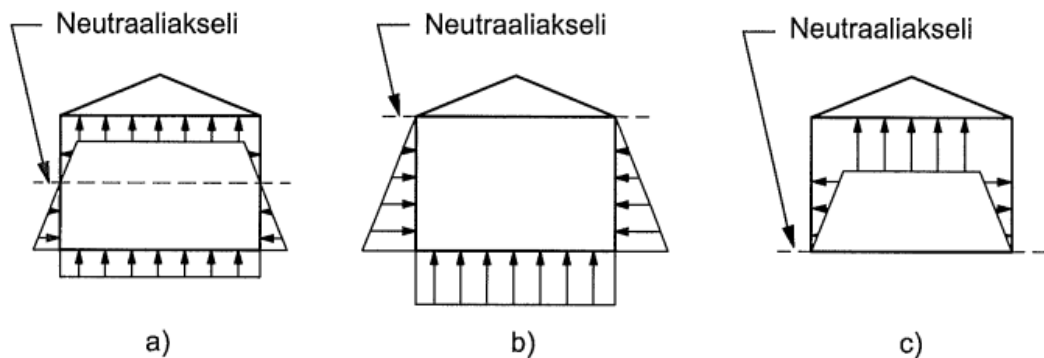
Myös tuuli aiheuttaa seinille painetta tai imua sen mukaan, mikä on tuulen suunta seinään nähden. Rakennuksen tuulen vastaiselle seinälle syntyy positiivinen paine. Rakennuksen sivuseinille ja tuulen vastaiselle seinälle taas syntyy negatiivinen paine eli imu tuulen hajaantuessa terävistä kulmista. (Hagentoft 2001, s. 72)

Muita paine-eroihin vaikuttavia tekijöitä on esimerkiksi ilmanvaihto. Koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä aiheuttaa rakennuksiin tyypillisesti 5–15 Pa alipainetta (RIL 250-2011, s. 84). Alipaine estää konvektiovirrat sisäilmasta rakenteisiin. Haittavaikutuksena rakenteista irtoavat epäpuhtaudet ja muut terveydelle vaaralliset aineet päätyvät sisäilmaan. Tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmissä syntyy vain 0–3 Pa alipaine (RIL 250-2011, s. 85). Kuva 3 havainnollistaa edellä mainittujen tekijöiden vaikutusta paine-eroihin esimerkkitapauksessa.



Kuva 3. Esimerkkitapaus tuulen ja ilmanvaihdon vaikutuksesta paine-eroihin (Sisäilmäyhdistys ry 2008).

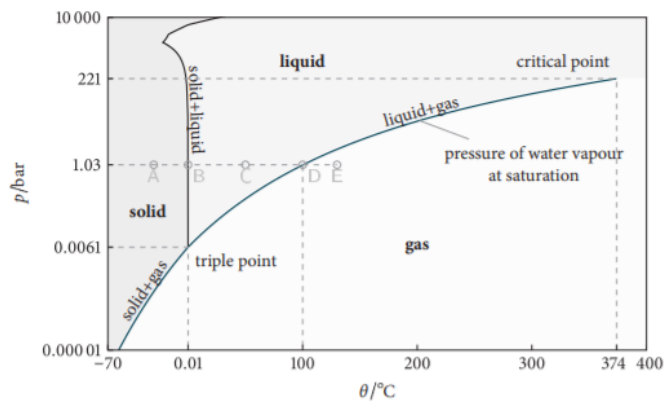
Tiiviissä rakenteessa neutraaliakseli syntyi rakennuksen keskiosaan. Kuvassa 4 on esitetty ilmavuotojen vaikutus neutraaliakselin sijaintiin.



Kuva 4. Savupiippuvaikutus: a) vaipan epätiiviydet tasaisesti jakautuneena, b) epätiivyyksiä vaipan yläosissa, c) epätiivyyksiä vaipan alaosissa. (Björkholtz 1997, Pentti & Hyypöläinen 1999 mukaan, s. 26)

2.2 Kosteus rakenteessa

Aine voi esiintyä kolmessa olomuodossa, jotka ovat kaasu, neste ja kiinteä aine. Veden tapauksessa olomuodot ovat vesihöyry, vesi ja jää. Suomen olosuhteissa ulkoseinään kohdistuu kosteusrasituksia veden kaikissa eri olomuodoissa. Veden olomuoto riippuu lämpötilasta ja paineesta, joka havaitaan kuvasta 5.



Kuva 5. Veden faasidiagrammi (Pinteric 2017, s.18).

Rakennusfysiikan kannalta kuvassa 5 erityisen kiinnostavaa on kaasun ja nesteen rajapinta, sillä kosteutta voi esiintyä huoneen lämmössä vesihöyrynä tai nestemäisenä vedenä. Jäätä esiintyy yleensä vain talviaikana ulkorakenteissa tai rakenteen ulkopinnan läheisyydessä.

2.2.1 Ilman vesihöyrypitoisuus ja suhteellinen kosteus

Ilma on kaasujen seos, johon voi sitoutua vesihöyryä. Nestemäisen veden höyrystymisen vesihöyryksi on energiaa vaativa ja hidas reaktio (Pinteric 2017, s. 104). Energiaa sitovaa reaktiota kutsutaan endotermiseksi. Vesihöyrystä ilmassa eli ilman kosteudesta puhutaan rakennusfysiikan yhteydessä yleensä ilman suhteellisena kosteutena. Suhteellinen kosteus voidaan ratkaista ilman vesihöyrypitoisuuksien tai vesihöyryn osapaineiden avulla.

Vesihöyrypitoisuus kertoo, kuinka paljon vettä on tietyssä tilavuudessa ilmaa. Vesihöyrypitoisuudelle on olemassa ilman lämpötilasta riippuva luonnollinen maksimiarvo. Tätä raja-arvoa kutsutaan vesihöyryn kyllästyspitoisuudeksi. Sen arvoista on esitetty taulukoituja arvoja eri lämpötiloille kirjallisuudessa. Kyllästyspitoisuutta voidaan kuvailla dynaamiseksi tasapainotilaksi, johon vapaa vesipinta ja ympäröivän ilman vesihöyrypitoisuus pyrkivät tasoittumaan. (Laukkarinen 2021b)

Toisaalta vesihöyryn kyllästymistä voidaan kuvata sen osapaineiden avulla. Tällöin puhutaan vesihöyryn kyllästyspaineesta p_{sat} . (Pinteric 2017, s. 102) Kyllästysosapaineelle on myös esitetty taulukkoarvoja kirjallisuudessa, mutta se voidaan myös laskea empiirisillä kaavoilla

$$p_{sat} = 610.5 \exp\left(\frac{17.269\theta}{237.3 + \theta}\right), \quad \theta > 0^\circ\text{C}, \quad (1)$$

$$p_{sat} = 610.5 \exp\left(\frac{21.875\theta}{265.5 + \theta}\right), \quad \theta < 0^\circ\text{C}, \quad (2)$$

joissa θ on kaasun lämpötila (Pinteric 2017, s. 102).

Suhteellisella kosteudella tarkoitetaan ilman vesihöyrypitoisuuden ja kyllästyspitoisuuden tai vesihöyryn osapaineen ja kyllästyspaineen suhdetta. Lämpötilan muuttuessa suhteellinen kosteus muuttuu, vaikka absoluuttinen vesimäärä säilyisikin samana. Suhteellisen kosteuden maksimiarvo on 100 %, jonka jälkeen kyllästynyt ilma pyrkii tiivistymään nesteeksi. (Pinteric 2017, s. 104)

Vesihöyryn tiivistymistä nesteeksi kutsutaan vesihöyryn kondensaatioksi. Vesihöyryn kondensoituminen on nopea energiaa vapauttava eli eksotermisen reaktio (Pinteric 2017, s. 104).

2.2.2 Hygroskooppisuus ja kapillaarisuus

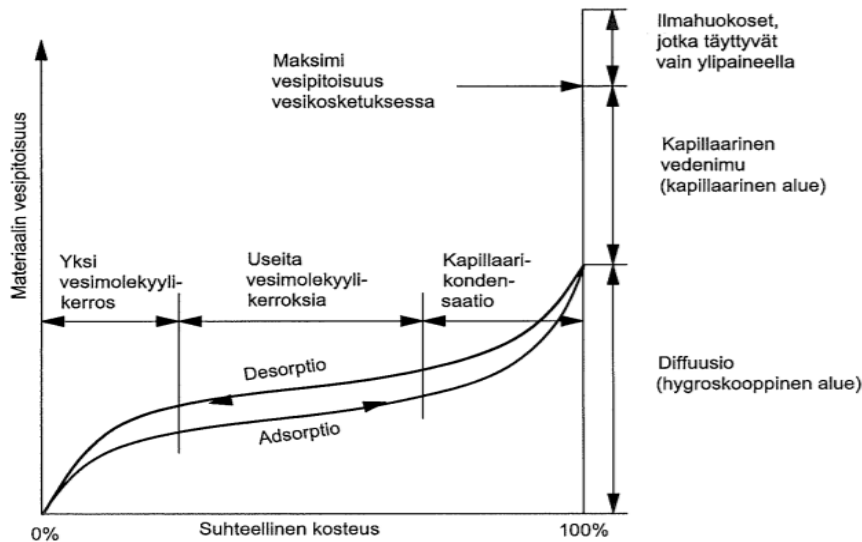
Ulkoseinärakenteeseen kohdistuu ulkoapäin vesi- ja lumisadetta. Pentin ja Hyypöläisen (1999, s.13) mukaan vesisateen vaakakomponentti eli viistosade on ulkoseinän kannalta merkittävin saderasitus. Viistosade voi muodostaa ulkoseinän pintamateriaalin huokoisuudesta ja sateen intensiteetistä riippuen seinän pinnalle yhtenäisen alaspäin valuvan vesikalvon. Tuuli voi liikuttaa vettä seinällä myös sivu- ja pystysuunnassa. (Pentti & Hyypöläinen 1999, s. 15)

Ulkoseinään kohdistuvasta viistosateesta tulee erityisen merkityksellistä, kun ulkoseinän ulkopinnassa on huokoinen materiaali. Huokoisilla materiaaleilla on kyky sitoa kosteutta ympäröivästä ilmasta, ja luovuttaa sitä ympäröivään ilmaan. Tätä ominaisuutta kutsutaan materiaalin hygroskooppisuudeksi. (Laukkarinen 2021b)

Huokoiseen materiaaliin voi sitoutua vettä monella tapaa. Esimerkiksi huokosten huokosilmassa voi olla kosteutta, suuriin huokosiin ja halkeamiin voi valua vettä painovoiman vaikutuksesta ja huokosten seinämiin voi tiivistyä kosteutta (Pentti & Hyypöläinen 1999, s. 27).

Adsorptiovesi on huokosen seinämiin van der Waalsin voimilla kiinnittynyttä vettä, joka lisääntyy suhteellisen kosteuden noustessa. Suhteellisen kosteuden noustessa tarpeeksi ohuisiin huokosiin alkaa kapillaarikondensoitua lisää vettä koheesion ja pintajännityksen seurauksena. (Pentti & Hyypöläinen 1999, s. 27) Lopulta huokokset täyttyvät vedellä, jonka seurauksena kosteuden kapillaarinen siirtyminen mahdollistuu. Kosteuden kapillaarinen siirtyminen on nestemäisen veden liikkumista materiaalin huokosverkossa. Vesi liikkuu pitkissä ja ohuissa kapillaarihuokosissa pintajännityksen vaikutuksesta (Pentti & Hyypöläinen 1999, s. 34), jonka vuoksi esimerkiksi puulla kapillaarista veden siirtymistä tapahtuu enemmän puun syiden suunnassa kuin niitä vastaan.

Kosteus pyrkii tasaantumaan tasapainokosteuteen ympäristön kanssa. Huokoisilla materiaaleilla voi kuitenkin olla samassa ympäristön suhteellisessa kosteudessa eri kosteustasoja riippuen nouseeko vai laskeeko materiaalin kosteuspitoisuus. (Pentti & Hyypöläinen 1999, s. 34) Yleensä kuivuessaan materiaali säilyttää enemmän kosteutta verrattuna siihen, mitä se voi kastuessaan varastoida samalla suhteellisella kosteudella (Hagentoft 2001, s. 92). Tätä ilmiötä kutsutaan hystereesiksi. Hystereesi-ilmiötä selittää esimerkiksi se, että materiaaliin jo sitoutunut vesi tukkii huokoskanavia estäen kuivuvan veden poistumisen materiaalista (Laukkarinen 2021b). Kuva 6 havainnollistaa tasapainokosteuden hystereesi-ilmiötä ja kapillaarikosteuden kertymistä materiaaliin.



Kuva 6. Tasapainokosteuden kuivumis- ja kastumiskäyrät suhteellisen kosteuden funktiona (Trechsel & Bomberg 1989, Pentti & Hyypöläinen 1999 mukaan, s. 30).

Kuvan 6 käyriä kutsutaan sorptiokäyriksi. Sorptiokäyrät ovat materiaali kohtaisia, sillä eri materiaalien huokosverkostojen ominaisuudet eroavat toisistaan (Pentti & Hyypöläinen 1999, s. 30). Sorptiokäyristä voidaan tutkia esimerkiksi niiden kaltevuutta. Sorptiokäyrän kaltevuus kuvaa materiaalin kosteuskapasiteettia eli materiaalin kykyä sitoa tai luovuttaa kosteutta suhteellisen kosteuden muuttuessa (Nilsson 2018, s. 10).

2.2.3 Vesihöyryn diffuusio

Pentin ja Hyypöläisen (1999, s. 12) mukaan ulkoseinän yksi merkittävimmistä kosteusrasituksista on sisäilman kosteus. Ennustetun ilmastonmuutoksen myötä ulkoilman suhteellinen kosteus voi myös nousta (Vinha et al. 2013, s. 2). Tämä tulee myös ottaa huomioon suunnittelussa kosteusteknisen toimivuuden takaamiseksi tulevaisuudessa.

Ulko-olosuhteet, kuten sade ja ulkolämpötila vaikuttavat rakennusta ympäröivän ilman kosteuteen. Rakennuksen sisäilman kosteus taas muodostuu pääosin ilmastoinnin ulkoa tuoman tuloilman sekä rakennuksen normaalista käytöstä aiheutuvasta kosteudesta. Muita sisäilman kosteuteen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa rakennuskosteuden kuivuminen sekä rakenteiden kyky sitoa ja luovuttaa kosteutta. (Pentti & Hyypöläinen 1999, s. 21–22) Sisäilmaan vaikuttavien tekijöiden vuoksi rakennuksen sisä- ja ulkoilman kosteudet ovat hyvin harvoin täysin tasapainossa keskenään.

Diffuusio on ilmiö, jossa aineen pitoisuudet pyrkivät tasoittumaan. Tasoittuminen tapahtuu väkevämmästä pitoisuudesta laimeampaan. Vesihöyryn diffuusiolla tämä tarkoittaa

sitä, että vesihöyrymolekyylit pyrkivät liikkumaan suuremmasta pitoisuudesta pienempään niin kauan, kunnes pitoisuudet ovat tasapainossa. (Hagentoft 2001, s. 5) Vesihöyryn diffuusiiovirran suunta rakennuksessa määräytyy siis sisä- ja ulkoilmassa vallitsevien vesihöyrypitoisuuksien mukaan.

Matemaattisesti ilmiötä kuvataan Fickin lailla, joka kuvaa diffuusiiovirran tiheyttä g aineen läpi. Rakenteen läpi tapahtuvaa diffuusiovirtaa voidaan kuvata vesihöyrypitoisuuksien tai vesihöyryn osapaineiden avulla. Fickin laki on vesihöyrypitoisuuden avulla esitettyinä

$$g = -D \frac{dv}{dx}, \quad (3)$$

jossa D on aineen diffuusiokerroin ja $\frac{dv}{dx}$ on vesihöyrypitoisuuden gradientti, joka kuvaa vesihöyrypitoisuuden muutosta materiaalin pituusyksikköä kohden. (Pinteric 2017, s.119)

Rakenteen läpi tapahtuvaan vesihöyryn diffuusioon vaikuttaa rakennekerrosten vesihöyryn diffuusiiovastukset. Materiaaleille löytyy kirjallisuudesta laajasti taulukoituja arvoja vesihöyryn diffuusiiovastuskertoimille μ , joiden avulla voidaan laskea materiaaleille diffuusiiovastus S_d . Kappaleen diffuusiiovastus saadaan kaavasta

$$S_d = \mu d, \quad (4)$$

jossa d on kappaleen paksuus. (Laukkarinen 2021b) Diffuusiiovastuksella voidaan edelleen laskea rakenteelle vesihöyrynvastus Z_v kaavalla

$$Z_v = \frac{S_d}{\delta_{v,air}}, \quad (5)$$

jossa $\delta_{v,air}$ on paikallaan olevan ilman vesihöyryn läpäisevyys (0,000025 m²/s). Summaamalla kerrosten vesihöyrynvastukset saadaan rakenteelle kokonaisvesihöyrynvastus $Z_{v,tot}$. (Laukkarinen 2021b)

2.3 Lämmön siirtyminen rakenteessa

Lämpö on molekyylien liike-energiaa aineessa (Laukkarinen 2021a). Lämmön liikkuminen voidaan määritellä energian siirtymiseksi alueelta toiselle niiden lämpötilaeron aiheuttaman tiheyseron vuoksi (Hagentoft 2001, s. 4). Lämpö siirtyy korkeammasta lämpötilasta matalampaan pyrkien tasoittamaan lämpötilaerot. Lämpöä voi siirtyä johtamalla, säteilemällä ja konvektion seurauksena (Pinteric 2017, s. 21).

2.3.1 Johtuminen ja kylmäsillat

Johtumisessa energia liikkuu materiaalin molekyylien värähtelyn seurauksena siten, ettei materiaalissa tapahdu molekyylien siirtymistä (Hagentoft 2001, s. 4). Värähdellessään molekyylit törmäävät viereisiin molekyyliihin, jolloin törmäyksen seurauksena osa sen liike-energiasta siirtyy paikallaan olevalle molekyytille. Korkeamman lämpötilan omaavalla alueella molekyylien liike ja nopeus ovat keskimäärin korkeammat, jonka johdosta lämpö johtuu korkeammasta lämpötilasta matalampaan. (Laukkarinen 2021a)

Matemaattisesti kuvattuna lämmön johtuminen on hyvin samankaltaista vesihöyryn diffuusion kanssa. Johtuminen voidaan kuvata Fourierin lailla, joka ilmaisee lämpövirran tiheyden materiaalin läpi. Kaavana tämä on

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (6)$$

jossa q_x on lämpövirran tiheys, λ on materiaalin lämmönjohtavuus ja $\frac{\partial T}{\partial x}$ on materiaalin lämpötilagradientti, joka kertoo lämpötilan muutoksen materiaalin pituusyksikköä kohden. (Pinteric 2017, s. 26)

Lämmön johtuminen rakenteen läpi on materiaalikohtaista, ja eri materiaaleille onkin määritelty kirjallisuudessa taulukoituja lämmönjohtavuuksia λ , joiden avulla voidaan määrittää materiaalikerrokselle lämmönvastus R . Lämmönvastus on materiaalikerroksen paksuuden suhde sen lämmönjohtavuuteen. Lämmönvastuksen kaava on

$$R = \frac{d}{\lambda}, \quad (7)$$

jossa d materiaalikerroksen paksuus. (Laukkarinen 2021a)

Rakenteille voidaan laskea kokonaislämmönvastus R_{tot} , riippumatta onko rakenteen poikkileikkaus homogeeninen vai ei. Tässä työssä ei perehdytä syvemmin kokonaislämmönvastuksen laskemiseen.

Rakennusosille määritetään usein lämmönläpäisykerroin eli U-arvo, joka on rakennekerrosten lämmönvastuksen käänteisluku eli

$$U = \frac{1}{R_{tot}} \quad (8)$$

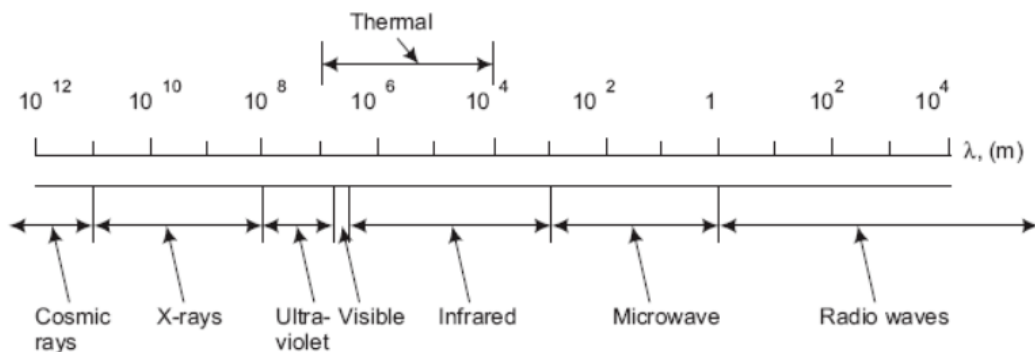
(Laukkarinen 2021a). Maankäyttö- ja rakennuslain (1010/2017) 1 luvun ja 2 pykälän mukaan lämmönläpäisykerroin ilmoittaa lämpövirran tiheyden, joka jatkuvuustilassa läpäisee rakennusosan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla olevien ilmatilojen välillä on yksikön suuruinen.

Kylmäsilat ovat paikallisesti huonosti lämmöneristettyjä kohtia, joissa lämpötilat poikkeavat rakenteen viereisten kohtien arvoista.

Vierekkäisten materiaalien lämmönjohtavuuksien erotessa toisistaan muodostuu kylmäsiltoja. Ne ovat paikallisesti huonosti lämmöneristettyjä kohtia, joissa lämpötilat poikkeavat rakenteen viereisten kohtien arvoista. Esimerkiksi puuelementteinille tyypillisellä rankarungolla runkotolpat muodostavat kylmäsiltojen suhteessa ympäröivään eristeeseen. (Laukkarinen 2021a) Kylmäsiltoja muodostuu helposti kiinnikkeisiin, sekä elementtien liitoksiin. Ne aiheuttavat rakennukselle suurempia lämpöhäviöitä ja kosteuden kondensoitumisriskin rakenteen sisäpintaan (Laukkarinen 2021a).

2.3.2 Lämpösäteily

Kaikki aineet, joiden lämpötila on yli absoluuttisen nolapisteen eli $-273,15$ celsiusasteen emittoivat lämpösäteilyä. Emitoidun lämpösäteilyn määrä riippuu kappaleen lämpötilasta. (Pinteric 2017, s. 41) Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituus vaihtelee välillä $0,1\text{--}100\ \mu\text{m}$ (Thirumaleshwar 2006). Sama voidaan todeta kuvasta 7, joka esittää sähkömagneettisen säteilyn spektrin.



Kuva 7. Sähkömagneettisen säteilyn spektri (Thirumaleshwar 2006).

Toisin kuin lämmön johtumisessa ja konvektiossa lämpösäteilyä tapahtuu sekä korkeammasta lämpötilasta matalampaan, että matalammasta korkeampaan. Näiden erotuksena saadaan kuitenkin nettosäteily, joka suuntautuu aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan. (Pinteric 2017, s. 47)

Ideaalitulassa säteilyä tarkasteltaessa puhutaan mustasta kappaleesta. Musta kappale on ideaali säteilijä, joka absorboi kaiken siihen osuvan säteilyn. Todellisuudessa materiaaliin osuessaan lämpösäteilyn energiasta osa absorboituu aineeseen, osa heijastuu pois ja osa voi kulkea sen läpi. Tällöin puhutaan harmaista kappaleista. (Pinteric 2017, s. 41, 44)

Lämpösäteily jaetaan lyhyt- ja pitkäaaltoiseen säteilyyn. Säteilyn aallonpituus riippuu säteilijän lämpötilasta (Pinteric 2017, s. 41).

Auringonvalo on lyhytaaltoista säteilyä, jolle rakennuksetkin altistuvat. Auringon lähettämän säteilyn teho on 1360 W/m^2 , mutta osa säteilystä absorboituu ilmakehään ja osa heijastuu takaisin ennen maan pinnalle päätymistä (Pinteric 2017, s. 43). Aurinko voi kuitenkin säteillä maan pinnalle kirkkaana kesäpäivänä jopa teholla 1000 W/m^2 (Hagentoft 2001, s. 48).

Ikkunoita lukuun ottamatta ulkoseinässä olevat rakennusmateriaalit eivät päästä lämpösäteilyä lävitsensä. Ikkunoista rakennuksen sisälle pääsevän lämpösäteilyn intensiteetti riippuu ikkunalasien ominaisuuksista, määrästä ja törmäävän säteilyn kulmasta. (Hagentoft 2001, s. 48) Vaikka seinämateriaalit eivät päästä lävitseen säteilyä, voi niihin absorboitua lämpöä.

3. PUURAKENTEIDEN LIITOSTEN TOTEUTUSOHJEITA

Rakennefysiikan kannalta olisi hyvä suunnitella elementtien liitokset niin, että höyryn- ja ilmansulkukerrokset jatkuvat liitoksen yli yhtenäisenä. Tämä ei ole kuitenkaan aina mahdollista, jonka vuoksi tiiveys on varmistettava muilla ratkaisuilla. Hyvän ratkaisun löytäminen edellyttää riskikohtien tunnistamista. Tässä luvussa käydään läpi hyväksi todettuja malliratkaisuja ja eri tutkimuksissa tutkittuja ratkaisuja liitoksille.

3.1 Tarkasteltavan ulkoseinän rakenne

Energiamääräysten kiristyminen on johtanut lämmöneristekerroksien paksuntamiseen. Sillä on voitu laskea rakenteen lämmönläpäisykerrointa. Rakennuksen vaipan läpi tapahtuvan lämpöhäviön suuruus saa olla enintään, sille vertailuarvoilla asetun lämpöhäviön suuruisen (MRL 3:23). Rakennuksen ulkoseinän lämmönläpäisykerrointa vertailuarvona käytetään laskennassa $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ (MRL 3:24). Fors (2021, s. 51) on diplomityötutkimuksessaan määrittänyt tarkasteltavalle rakenteelle lämmönläpäisykerroiniksi $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, kun lämmöneristeenä käytetään kutterinlastun ja sahanpurun yhdistelmää. Lisäksi laskennassa käytettiin tuulensuojana vain 25 mm paksua mineraalivillaista tuulensuojalevyä. Tarkasteltavaksi valittu rakenne on kuvan 8 mukainen. Lämmöneristekerroksen paksuudella on myös vaikutusta rakenteen kosteustekniseen toimintaan.

Vain lämmöneristekerrosta paksuntamalla ei päästä energian kulutustavoitteisiin, jonka vuoksi huomiota kiinnitetään myös rakenteiden ilmatiiveyteen. Rakennuksen vaipan läpi kulkeva konvektiovirta kuljettaa suuren määrän lämpöä ja kosteutta mukanaan, jonka johdosta rakennuksen energiatehokkuus huononee. Lämpöhäviön lisäksi konvektiovirran kuljettama kosteus lisää mikrobien kasvulle otollisten olosuhteiden muodostumista rakenteisiin. Vaipan läpi tapahtuvia ilmavirtauksia mitataan ilmanvuotoluvulla q_{50} , jolle on asetettu maksimiarvo $4,0 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ (MRL 4:27). Suositeltavaa on kuitenkin, että vaipan läpi tapahtuva ilmavuoto olisi tavoitearvon $1,0 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ mukainen (RIL 250-2020, s. 126).



Kuva 8. Tarkasteltavan rakenteen poikkikeikkaus (Forss 2021, s. 41).

Rakenteen ulkoverhouksen tulee olla esteettinen riippuen rakennuksen käyttötarkoituksesta. Ulkonäön lisäksi ulkoverhouksen tehtävä on estää viistosateen pääsy rakenteisiin. Viistosade voi kuitenkin kapillaarisesti imeytyä ulkoverhoukseen. Tätä pyritään estämään ulkoverhouspaneelien pintakäsittelyllä, jonka tarkoitus ulkonäön kohentamisen lisäksi on tukkia pinnan kapillaarihuokoisia.

Pintakäsittelystä huolimatta ulkoverhoukseen imeytyneen kosteuden liike kohti rakenteita katkaistaan tuuletusraolla, joka on toteutettu pystykoolauksena. Pystykoolaus mahdollistaa ilman liikkeen alhaalta ylöspäin. Tuuletusraon avulla kuivatetaan myös sisältäpäin rakenteisiin kertynyttä kosteutta.

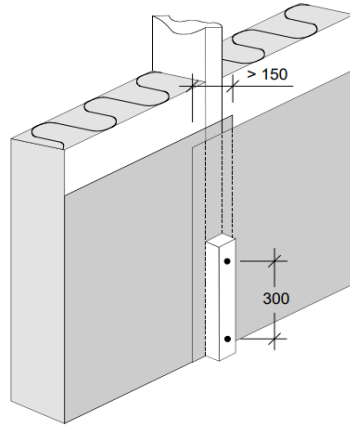
Seuraavana rakenneosana on mineraalivillainen tuulensuojalevy. Tuulensuojan tehtävänä on rajoittaa haitallisia ilmavirtauksia eristekerroksessa ja suojata varsinaista lämmöneristekerrosta virtausten aiheuttamalta lämpöteknisten ominaisuuksien heikkenemiseltä (RIL 250-2020, s. 125). Tuulensuoja voi altistaa ilmavirtojen lisäksi vesihöyryn diffusiovirralle ja sen konvektiolle, minkä vuoksi mineraalivillaisen tuulensuojalevyn pinnoitteen vesihöyrynläpäisevyys tulee olla riittävän suuri (Vinha et al. 2014, s. 259). Vesihöyrynläpäisevyys ehkäisee sisältäpäin vaikuttavan vesihöyryn konvektion tai sen diffuusion tiivistymisen tuulensuojan pinnoitteen sisäpintaan. Tuulensuojan sisäpinnan kosteusteknistä toimintaa voidaan parantaa myös sen lämpöä eristävillä ominaisuuksilla. Puurakenteita suojaavan tuulensuojan lämmönvastuksen tulisi olla ainakin $0,5 \text{ m}^2\text{K/W}$. (RIL 250-2020, s. 133) Lämmönvastuksen kasvatus nostaa tuulensuojan sisäpinnan lämpötilaa, jolloin sen suhteellinen kosteus laskee. Mineraalivillaisen tuulensuojalevyn lämmönjohtavuus on luokkaa $0,031\text{--}0,034 \text{ W}/(\text{mK})$ (Vinha et al. 2014, s. 259), josta saadaan kaavaa 7 käyttäen lämmönvastukseksi $1,47\text{--}1,61 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Mineraalivillainen tuulensuojalevy muodostaa yhtenäisen eristekerroksen kantavien runkotolppien katkaistessa pääasiallisen eristekerroksen. Lämpöä eristävällä tuulensuojalla voidaan parantaa tuulensuojan sisäpinnan tavoin myös kantavan rungon kosteusteknistä toimintaa (Vinha et al. 2014, s. 42). Pääasiallisena eristeenä rakenteessa toimii sahanpuru- ja kutterinlastueriste, joilla on korkea kosteuskapasiteetti (Forss 2020, s. 111). Korkea kosteuskapasiteetti mahdollistaa kosteusolojen tasaamisen rakenteessa. Sahanpuru- ja kutterinlastueristeille ominaista on, että lämmönjohtavuus kasvaa selvästi kosteuspitoisuuden kasvaessa. Niiden lämmönjohtavuus ilman lisäaineita vaihtelee karkeasti välillä 0,052–0,069 W/(mK). (Vinha et al. 2014 s. 273)

Lämmön eristettä ja runkorakenteita pyritään suojamaan sisäpuoliselta vesihöyryn konvektiolta tiiviillä ilmansulkukerroksella. Ilmansululla minimoidaan myös konvektiovirtojen aiheuttamia lämpöhäviöitä vaipan läpi. Pienetkin reiät ilmansulkukerroksessa voivat aiheuttaa suuria ilmavirtauksia (RIL 250-2020, s. 126). Ilmansulku voi olla esimerkiksi kalvo-, levy-, kivi- tai massiivipuorakenne (Vinha et al. 2014 s. 41). Tarkasteltavassa rakenteessa ilmansulun muodostaa reunoistaan tiivistetty ilmansulkupaperi.

Ilmansulkukerroksen ilmatiiveys ilmansulkukalvoja käytettäessä voidaan saada aikaan limittämällä ja teippaamalla kalvot riittävän pitkäaikaiskestävyyden ja tartuntalujuuden omaavalla teipillä. Toinen tapa on käyttää puristusliitosta, jossa ilmansulkukalvo limitetään ja puristetaan toisella puurimalla ruuveja käyttäen. Puristusliitoksessa riittävä tiiveys saavutetaan 300 mm ruuvijaolla. Varmin tapa liittää ilmansulkukalvot saadaan, kun käytetään teippauksen ja puristusliitoksen yhdistelmää. (Aho & Korpi 2009, s. 14)

Puristusliitoksen ja teippauksen yhdistelmällä voidaan parantaa kalvojen liitoksen tiiveyden lisäksi sen pitkäaikaiskestävyyttä, jonka vuoksi sen käyttö on suositeltavaa aina kun mahdollista (Aho & Korpi 2009, s. 97). Kuvassa 9 on esitetty, kuinka puristusliitos toteutetaan puurankaseinässä. Kuvan 9 liitosta voitaisiin kehittää vielä teippaamalla rangon vasemmanpuoleisen kalvon reuna kiinni alempaan kalvoon.



Kuva 9. Ilmansulkukalvojen puristusliitos rankarunkoseinän runkorangan kohdalla (Aho & Korpi 2009, s. 15).

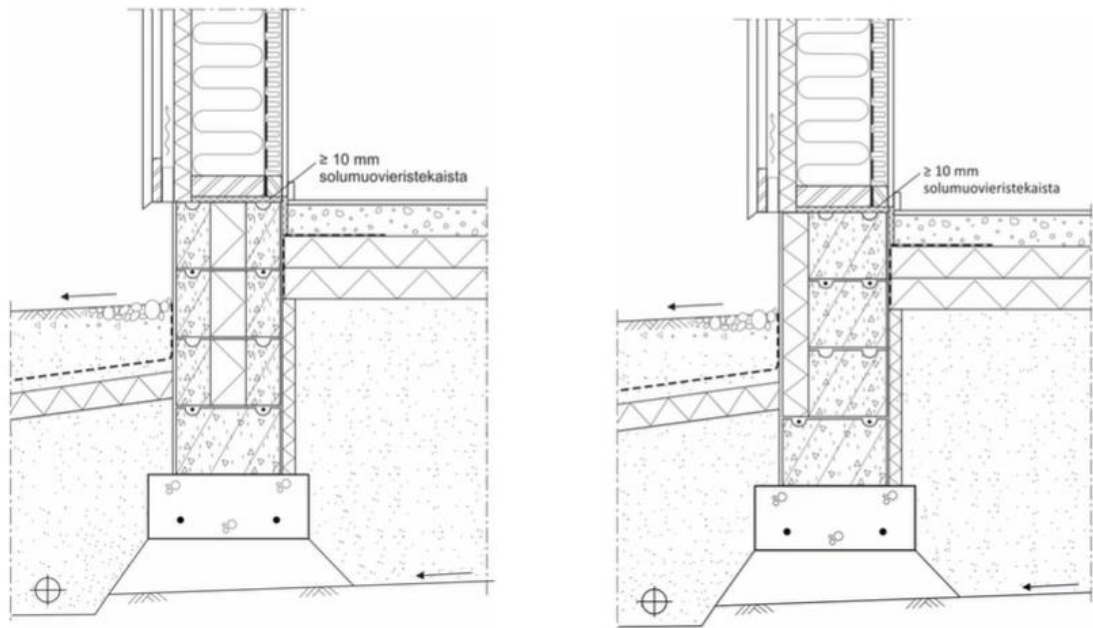
Konvektiovirtojen lisäksi rakenteet tulee suojata sisäpuolisen vesihöyryn diffuusiolta. Rakenteet suojataan vesihöyryn diffuusiolta höyrynsulun avulla. Höyrynsulkuna rakenteessa voi olla mikä tahansa tiivis ja yhtenäinen rakennekerros, joka sijaitsee rakenteen lämpimällä puolella, ja jolla on riittävä vesihöyrynvastus. (Vinha et al. 2014 s. 41) Tarkasteltavassa rakenteessa höyrynsulkuna on käytetty vaneria.

Tampereen teknillisessä korkeakoulussa on tutkittu samankaltaista seinärakennetta, jossa käytettiin höyrynsulkuna vaneria ja ilmansulkuna bitumipaperia (Vinha 1999). Tutkimuksen perusteella Vinha (1999, s. 66) toteaa vanerin saumojen osalta suurimman kosteustekninen riskin syntyvän kosteuden diffuusion sijaan kosteuden konvektiosta, jonka kulkeutuminen rakenteisiin voidaan estää vanerin takaisella ilmansululla.

3.2 Ulkoseinä-alapohjaliitos

Puurankaseinissä ulkoseinän ja alapohjan liitoksessa mikrobikasvustolle otollisimmat olosuhteet syntyvät alaohjauspuuhun. Alaohjauspuun mikrobikasvustoa ei yleisesti sallita alaohjauspuun alueella (RIL 250-2020, s. 119–120). Alaohjauspuu voi rakennusaikeisesta kosteudesta kastuessaan pysyä kosteana useita vuosia puun alapinnan keski-alueelta. Elementin alajuoksun lisääminen alaohjauspuun päälle pidentää kuivumisaikaa huomattavasti myös alaohjauspuun yläpinnan osalta. (Vinha & Raunima 2021, s. 74) Tämän vuoksi alapohjaliitoksen toteutuksessa ensisijaisen tärkeää on alaohjauspuun kuivana asentaminen ja työnaikainen suojaus.

Rakennuskosteuden lisäksi alaohjauspuu altistuu kosteuden kapillaariselle nousulle perusmuurista, sekä vesihöyryn diffuusio- ja konvektiovirroille. Kuvassa 10 on esitetty kaksi malliratkaisua alapohjan ja ulkoseinän välisen liitoksen toteutukselle paikalla rakennettaessa.



Kuva 10. Mallirakenne alapohjan ja ulkoseinän liitokselle (RIL 250-2020, s.142).

Kuivan alaohjauspuun käytönaikaisia olosuhteita voidaan parantaa ulkopuolisella lämmöneristyksellä (Vinha & Raunima 2021, s. 74), jonka vuoksi kuvan 10 molemmissa ratkaisuissa on keskitytty alaohjauspuun lämmöneristykseen. Lämmöneristyksellä ei voida nopeuttaa alaohjauspuun kuivumista merkittävästi, mutta kuivana asennettaessa voidaan vaikuttaa sen käytönaikaisiin olosuhteisiin (Vinha & Raunima 2021, s.74).

Lämmöneristyksellä pyritään pitämään suhteellinen kosteus alaohjauspuun ympärillä riittävän matalana, jotta mikrobikasvustolle otollisia olosuhteita ei synny. Ratkaisuissa on pyritty parantamaan alaohjauspuun olosuhteita muun muassa valitsemalla lämpöä eristävä tuulensuoja, joka on tuotu alaohjauspuun yli perusmuuriin asti.

Kuvan 10 oikeanpuoleisessa ratkaisussa perusmuurin eristys on tuotu sen ulkopintaan. Tämä on alaohjauspuun kannalta rakennusfysikaalisesti parempi ratkaisu, sillä myös alaohjauspuun ulkoreunan alapinta saadaan eristettyä. Lämmöneristyskerroksen paksuus tulee myös huomioida, jotta liitosalueelle ei muodostu kylmäsiltaa (RIL 250-2020, s. 142).

Perusmuuri ja antura altistuvat maaperän kosteudelle, vaikkakin kosteutta pyritään ohjaamaan pois perusmuurilta pinta- ja perusmaan kaltevuudella sekä salaojituksella. Sitä pyritään suojaamaan kosteudelta myös anturan alle sijoitetulla sepeli- tai murskekerroksella ja perusmuurin ulkoreunaan laitettavalla perusmuurilevyllä (RIL 250-2020, s. 142). Kosteus voi nousta perusmuurissa ylöspäin kapillaarisesti.

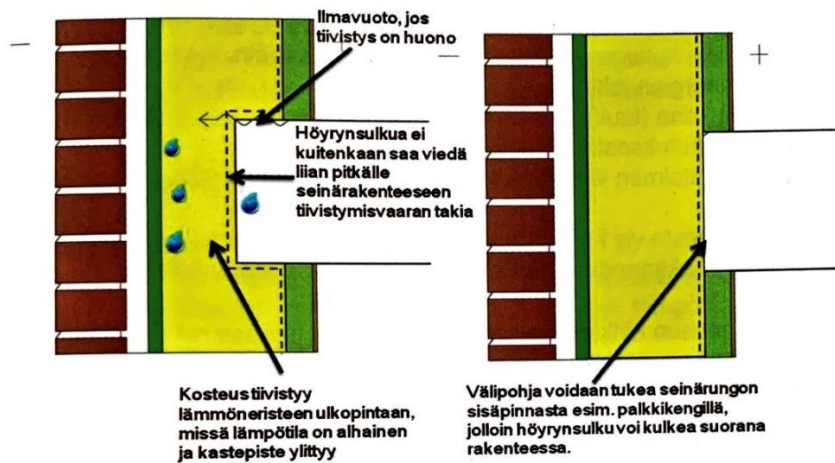
Kuvan 10 ratkaisussa alaohjauspuun alle on sijoitettu vähintään 10 mm paksu solumuovikaista, joka estää kosteuden kapillaarisen nousun perusmuurista seinärakenteeseen. Lisäksi se nostaa alaohjauspuun alapinnan lämpötilaa ja mahdollistaa liitoksen ilmatiiviin toteutuksen. (RIL 250-2020, s. 142) Kapillaarikatkona on käytetty myös bitumikermiä, mutta parempana vaihtoehtona voidaan pitää kuvan 10 mukaisesti solumuovikaistaa sen lämpöä eristävien ominaisuuksien vuoksi.

Vaikka mikrobikasvuston syntyä pyritään estämään alaohjauspuussa, voidaan sen syntyminen alaohjauspuun alareunassa sallia rakennusaikaisen kosteuden seurauksena, jos ilmansulkukerros on tuotu tiiviisti alaohjauspuun yli kiinni lattiaalaan ulkoreunaan (RIL 250-2020, s. 120). Näin estetään terveydelle haitallisten mikrobien pääsy sisäilmaan. Kuvan 10 rakenteessa höyryn- ja ilmansulku on tuotu alaohjauspuun yli ja kiinnitetty siihen puristusliitoksella. Puristusliitos voidaan toteuttaa alaluvun 3.1 ilmasulkukalvon puristusliitosohjeita soveltamalla. Alaohjauspuu ja siihen kiinnitetyn höyryn- ja ilmansulku liittyy perusmuuriin tiiviisti käytettäessä solumuovikaistaa alaohjauspuun alla.

3.3 Ulkoseinä- välipohjaliitos

Ulkoseinän eristetilassa ja sen molemmilla rajapinnoilla oleva mikrobikasvusto ei ole sallittavissa käytettäessä huokoisia eristeitä (RIL 250-2020, s. 116). Mikrobikasvustosta voi siirtyä konvektiovirtojen mukana terveydelle vaarallisia aineita rakennuksen sisäilmaan.

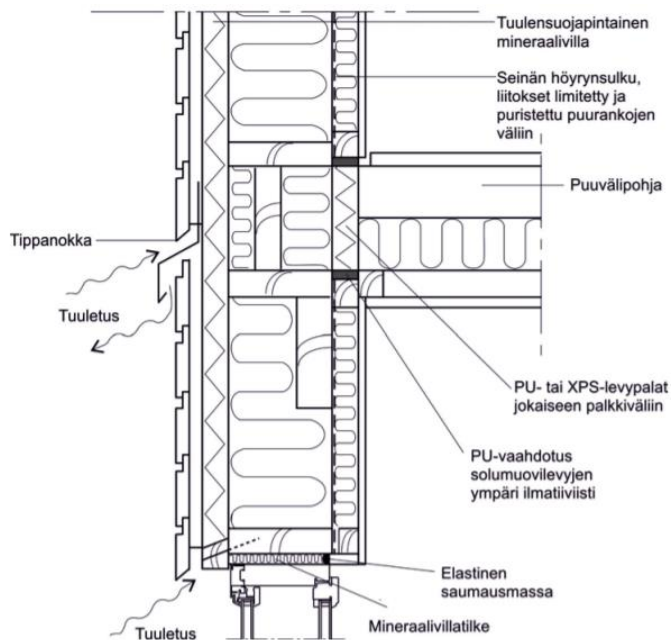
Ulkoseinän ja välipohjan välisen liitoksen suunnittelussa merkittävää on välipohjan kannattamistavan valinta. Välipohjapalkit voidaan tuoda osittain ulkoseinän päälle, jolloin seinän runkotolppien yläpäässä kulkeva palkki jakaa kuormat runkotolpille. Kun välipohjapalkit tuodaan ulkoseinän päälle ja höyrynsulku kiertää välipohjapalkit, ulkoseinän lämmöneristekerros ohenee paikallisesti. Tämä aiheuttaa homehtumis- ja kondensoitumisriskin, jos lämpötila höyryn- ja ilmansulun kohdalla pääsee alenemaan välipohjan lämpöä eristävien materiaalien vuoksi (RIL 250-2020, s. 114). Toisin sanoen mitä syvemmältä välipohja joudutaan kannattamaan, sitä suurempi vesihöyryn kondensoitumisriski syntyy. Kuvan 11 vasemmanpuoleinen ratkaisu havainnollistaa tilannetta.



Kuva 11. Kondenssi- ja homehtumisriski välipohjan ja ulkoseinän liitoksessa (RIL 250-2011, s. 71).

Kuvan 11 vasemmanpuoleisessa ratkaisussa toisen ongelman voi aiheuttaa välipohjan liikkeet. Välipohjan taipuilla välipohjan palkit voivat vaurioittaa höyryn- ja ilmansulkua runkotolppiin upotetun palkin kulmasta.

Kondenssi- ja homehtumisriskiä voidaan vähentää esimerkiksi siirtämällä höyrynsulku-kerros kulkemaan suorassa linjassa lämmönriesteen lämpimällä puolella, jolloin vesihöyryä läpäisemättömät rajapinnat säilyvät riittävän lämpimissä olosuhteissa. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi kuvan 12 mukaisella ratkaisulla.



Kuva 12. Välipohjan ja ulkoseinän välinen liitos, jossa höyryn- ja ilmansulku on suorassa linjassa, mutta välipohja on kannatettu ulkoseinän päältä (Vinha et al. 2014).

Kuvan 12 liitoksessa höyryn- ja ilmansulku liitetään alemman ulkoseinän yläreunaan ja ylemmän ulkoseinän alareunaan puristusliitoksella. Puristusliitokset voidaan toteuttaa alaluvun 3.1 ilmasulkukalvon puristusliitosohjeita soveltamalla. Lisäksi jokaisen välipohjapalkin väliin on laitettu höyryn- ja ilmansulun jatkoksi umpisoluista eristelevyä, jonka reunat vaahdotetaan joustavalla PU-vaahdolla välipohjapalkkeja ja puristusliitoksen kooauspuuta vasten. Ylimääräistä vaahtoa ei saa leikata, ettei PU-vaahdon umpisoluinen pinta vaurioidu.

Välipohjaa ei tarvitse välttämättä viedä kuvan 12 mukaisesti pitkälle ulkoseinän päälle, jos toisen kerroksen ulkoseinää ei kannateta edelleen välipohjan päältä. Tämä voidaan toteuttaa myös niin, että välipohja lovetaan ulkoseinään, jolloin toisen kerroksen ulkoseinä kannatetaan ensimmäisen kerroksen ulkoseinän päältä. Tällöin välipohjan kuormista riippuen se voidaan kannattaa hyvin pienellä sisennyksellä.

Rakennusfysikaalisesti paras vaihtoehto on kannattaa välipohja viemättä välipohjapalkkeja ulkoseinän päälle kuvan 11 oikeanpuoleisen ratkaisun omaisesti. Tällöin kondenssiriski on pienin. Kannatus voidaan toteuttaa seinätolppiin upotetusta palkista palkkikien avulla. Tässä ratkaisussa ilman- ja höyrynsulku säilyvät yhtenäisenä samassa linjassa seinäpinnan kanssa, eivätkä välipohjapalkit muodosta kylmäsiltoja rakenteeseen.

Palkkikien kiinnityksen vuoksi kuitenkin välipohjaelementin hyödyntäminen on erittäin haastavaa, sillä välipohjapalkkien kohdistaminen palkkikiin vaatisi hyvin mittatarkkaa materiaalia, tuotantoa ja työmaatyöskentelyä. Ratkaisu sopii paremmin välipohjan paikalla rakentamiseen, kun jokainen välipohjan palkki voidaan kiinnittää erikseen.

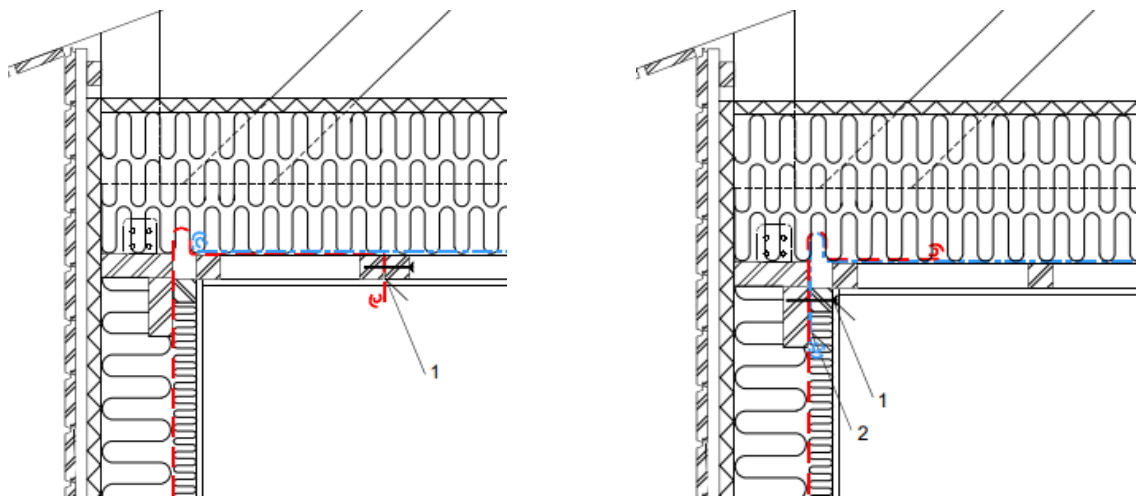
3.4 Ulkoseinä-yläpohjaliitos

Yläpohjaliitoksen osalta mikrobikasvustoa ei sallita yläpohjarakenteissa muualla kuin tuuletusaukkojen välittömässä läheisyydessä ja vesikatteen alapinnassa (RIL 250-2020, s. 118). Yläpohjalle tyypillisiä ongelmia tuottaa eristeen painuminen ja korkeammassa rakennuksissa ylipaineen aiheuttamat konvektiovirrat.

Käytettäessä painuvia puhalluseristeitä syntyy ajan kuluessa ristikkorakenteisen yläpohjan vinosauvojen alareunaan painumaonkaloita, joihin eristekerroksen läpäisevät kosteusvirrat keskittyvät. Tämä voi aiheuttaa mikrobikasvulle otollisten olosuhteiden syntymistä vinosauvojen yläreunaan. Ongelmaa voidaan estää painumattomien eristeiden käytöllä, vinosauvojen alle tehdyillä painumattomilla eristepaloilla tai jälkikäteen tehdyillä lisäpuhalluksella. (RIL 250-2020, s. 129)

Painumaonkaloihin kohdistuvaa kosteusrasitusta voidaan pienentää myös yläpohjan ilmatiiveydellä. Ilmatiiveyden varmistamiseksi voidaan soveltaa alaluvussa 3.1 seinärakenteen ilmansulkukalvolle esitettyjä menetelmiä.

Ilmatiiveyden säilyvyyden takaamiseksi tulee suunnittelussa ottaa huomioon rakenteiden muodonmuutokset. Erityisesti matalissa NR-ristikko ratkaisussa ala- ja yläpaarteiden erilaisesta kosteustilasta johtuen rakenteen kosteusmuodonmuutokset lisääntyvät merkittävästi tulevaisuuden ilmastossa (Lahdensivu et al. 2012, s. 61). Tämä tulee huomioida liitoksen tiivistämisen suunnittelussa siten, ettei ilmansulkukalvoa kiristetä liian kireälle nurkan kohdalta. Kuvassa 12 on esitetty kaksi tapaa viedä kalvomainen höyryn- ja ilmansulku yläpohjaliitoksen yli.



Kuva 12. Kaksi yläpohjaliitoksen kalvomaisen höyryn- ja ilmansulun tiivistystapaa. (Aho & Korpi 2009, s. 49–50)

Kuvassa 13 vasemmassa ratkaisussa ulkoseinän ilmansulkukalvo tuodaan katon ilmansulkukalvon alla vähintään yhden alaslaskuriman välin verran, jonka jälkeen se puristetaan alaslaskurimaan erillisellä puurimalla. Huomiota tulee kiinnittää liityksen pituuteen (Aho & Korpi 2009, s. 53).

Yksinkertaisempaan ratkaisuun voidaan pitää kuvan 13 oikeanpuoleista ratkaisua, sillä sitä käytettäessä rakennuksen sivu- ja päätyseinät voidaan toteuttaa samalla menetelmällä (Aho & Korpi 2009 s. 51). Saman tyylin käyttäminen rakennuksen kaikissa sivuissa helpottaa myös nurkkien tiivistämistä. Kyseisessä ratkaisussa katon ilmansulkukalvo on tuotu seinälle seinän ilmansulkukalvon sisäpuolelle, jossa se voidaan liittää seinän ilmansulkukalvoon teippaamalla ja puristusliitoksella. Seinän ilmansulkukalvo tulee viedä riittävän pitkälle lämmöneristeen alle katolla (Aho & Korpi 2009, s. 51).

Ulkoseinän ja yläpohjan liitoksessa tulee varmistaa liitoksen ilmatiiveyden lisäksi yläpohjan tuuletus mahdollisuus ulkoilmasta. Yläpohjaa tulee tuulettaa, mutta liian suuri tuuletus voi heikentää tuuletustilan kosteusolosuhteita (Lahdensivu et al. 2012, s. 59). Liian suuri tuuletus johtaa tuuletustilan turhaan jäähtymiseen, joka puolestaan nostaa sen suhteellista kosteutta. Tuuletustilan suositeltava ilmanvaihtokerroin on 0,5–1,0 1/h (Lahdensivu et al. 2012, s. 59).

Ilmanvaihdon rajoittaminen on erityisen tärkeää, kun tuuletustilaa eristetään. Aluskatteeksi suositellaan vettä pitävää, mutta vesihöyryäläpäisevää ja lämpöä eristävää aluskatetta. Aluskatteen lämmönvastuksen tulisi olla ainakin 0,5 m²K/W, joka vastaa esimerkiksi 20 mm paksuista EPS- tai XPS-eristettä. (RIL 250-2020, s. 128–129)

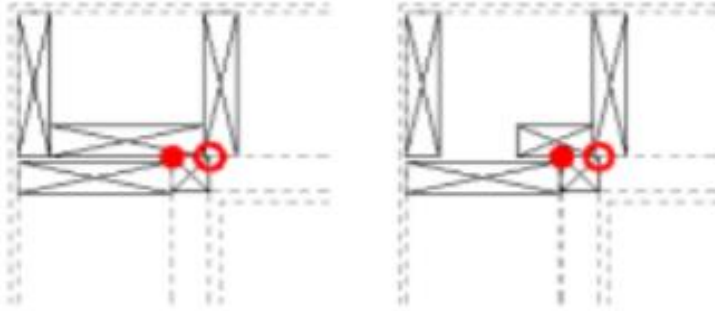
Lisäksi kosteutta sitovan eli hygroskooppisen eristeen valinnalla voidaan parantaa tuuletustilan olosuhteita. Hygroskooppinen eriste tasaa tuuletustilan kosteusvaihteluita. (RIL 250-2020, s.129)

3.5 Ulkoseinien ulko- ja sisänurkka

Ulkoseinien ulko- ja sisänurkille kosteusteknisesti kriittisiä paikkoja normaalin ulkoseinän tavoin ovat höyryn- ja ilmansulun molemmat puolet sekä tuulensuojan sisäpinta. Moisio (2020) on diplomitutkimuksessaan tarkastellut elementtien nurkkaliitoksia laskentatarkasteluihin.

Moisio (2020) tarkasteli tutkimuksessaan muun muassa ulko- ja sisänurkan runkorankojen ulkoreunojen ja tuulensuojan sisäpinnan kosteusteknistä toimintaa erilaisilla rakenteilla. Tutkimuksessa havaittiin, että lämpöä eristävällä tuulensuojalla voidaan parantaa ulkonurkan rakenteiden ulko-osien kosteusteknistä toimintaa. Tutkimuksessa havaittiin myös lämpöä eristävän tuulensuojan olevan vikasietoisempi asennusvirheille verrattuna perinteisesti käytettyyn tuulensuojakipsilevyyn.

Nurkkien ulko-osien lisäksi Moisio (2020) tarkasteli tutkimuksessaan runkorankojen ja sisäkoolausten sijoittelun merkitystä höyryn- ja ilmansulun kosteustekniseen toimintaan. Kuvassa 14 on kaksi tutkittua sijoitteluvaihtoehtoa ulkonurkille, joissa havaittiin homeindeksin ylittävän sallittavan raja-arvon jo tämänhetkisessä ilmastossa (Moisio 2020, s. 70).

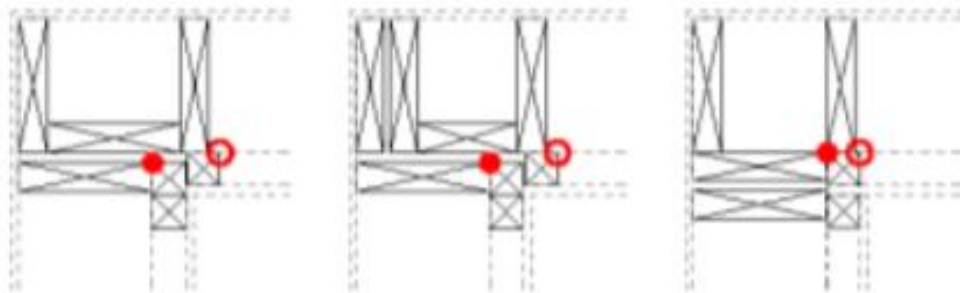


Kuva 14. Huonosti toimivia ratkaisuja runkotolppien ja sisäkoolauksen sijoittelulle (Vinha & Raunima 2021, s. 70).

Kuvan 14 rakenteiden toimimattomuuden aiheuttaa se, että runkotolpan sisäpuolinen osa kylmenee lämmöneristykseen seurauksena. Tällöin höyrynsulun sisäpuolinen kosteus aiheuttaa kondenssiriskin höyrynsulun sisäpintaan runkotolpankohdalle.

Tilannetta voidaan parantaa käyttämällä vaakakoolauksen sijaan pystykoolausta, jolloin joudutaan sijoittamaan koolaustolppia yhden nurkkatolpan lisäksi myös sen vierustoille sisäverhouslevyn päiden kiinnittämiseksi. Tämä vähentää lämmöneristystä runkotolpan sisäpinnassa, jolloin se lämpenee ja kondenssiriski vähenee.

Kuvassa 15 on esitetty kolme parempaa Moision (2020) tutkimaa sijoitteluvaihtoehtoja ulkonurkille, joiden homeindeksien arvot alittivat raja-arvot vielä vuoden 2050 ilmastossa, mutta eivät vuoden 2100 ilmastossa (Moisio 2020, s. 70).

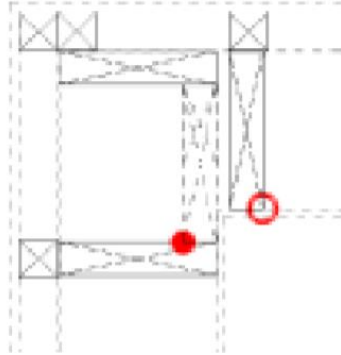


Kuva 15. Toistaiseksi toimivia sijoittelu vaihtoehtoja runkotolpille ja sisäkoolaukselle (Vinha & Raunima 2021, s. 70).

Tilannetta voidaan vielä parantaa siirtämällä höyrynsulku nurkassa koolauspuiden sisäpuolelle. Höyrynsulun siirtämisen positiivinen vaikutus nurkan kosteustekniseen toimintaan todennettiin laskelmin, mutta tutkimuksessa ei tarkasteltu höyrynsulkukerroksen sijainnin muutoksia yhdistettynä nurkan tolpitukseen ja sisäkoolauksen asetteluihin. (Moisio 2020, s. 133–135)

Sisänurkan tapauksessa runkotolpat muodostavat kotelon lämmöneristykseen kylmälle puolelle. Puun vesihöyrynläpäisevyys on huono, jonka vuoksi kondenssiriski syntyy ko-

telon sisäpintaan. Kuvassa 16 on esitetty Moision (2020) tarkastelemaa ratkaisua sisäkulmalle, jonka homeindeksien arvot ylittivät raja-arvon jo vuoden 2050 ilmastossa kaikilla tutkituilla rakennetyypeillä (Moisio 2020, s. 141).



Kuva 16. Toistaiseksi toimiva sisäkulman tolppien sijoitteluratkaisu (Vinha & Raunima 2021, s. 72).

Lämpöä eristävällä tuulen tuulensuojalla voidaan parantaa myös sisänurkan ulko-osien kosteusteknistä toimintaa, mutta ei riittävästi. Sisäkoolauksen sijoittelu ei vaikuttanut sisänurkan kosteustekniseen toimintaan, mutta poistamalla tai vaihtamalla kapeampaan kuvan 16 katkoviivalla esitetty runkoranka voidaan muuttaa rakenteiden kosteusteknistä toimintaa siten, ettei homeindeksin maksimiarvo ylitä. (Moisio 2020, s. 141) Tätä ei kuitenkaan tutkimuksessa varmennettu laskelmin.

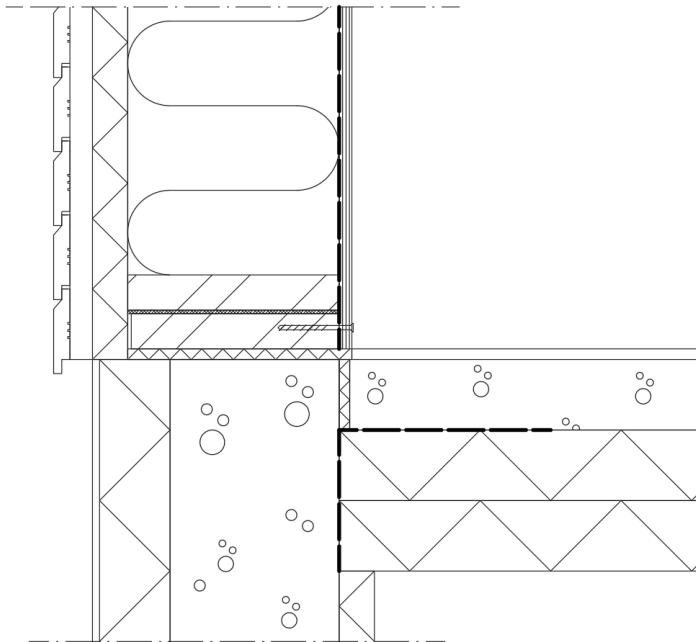
Tutkimuksessa ei löydetty täysin toimivia ratkaisuja nurkkaliitoksille vuoden 2100 ilmastossa, jonka vuoksi rakennetta tulisi muuttaa kokonaan. Tutkimuksen perusteella voidaan ohjeistaa kuitenkin yleisesti, että ulkoseinien nurkkaliitoksissa tulee välttää tilannetta, jossa sisäpuolisen koolaus- ja lämmöneristekerroksen taakse viety höyrynsulkukalvo on suoraan kylmäsiirtana toimivan puurangan kautta kytköksissä ulkoilmaan. Vastaavasti tulee välttää puurangan asettamista nurkka-alueella lämmöneristekerroksen ulkopintaan siten, että lämmöneristeen kylmälle puolelle muodostuu suuren diffuusiovastuksen omaava umpinainen kotelo. (Vinha & Raunima 2021, s. 74)

4. TARKASTELTAVAN RAKENTEEN LIITOKSET

Tässä luvussa käsitellään luvun 3 malliratkaisujen ja tutkimuksista saatujen ohjeistusten perusteella tuotettuja detaljikuvia ja niiden toteutustapoja. Detaljikuva on tuotettu alaluvussa 3.1 esitetylle rakenteelle.

Alapohjan liitosdetalji

Alapohjantapauksessa alaluvun 3.2 malliratkaisua voitiin soveltaa hyvin tarkasteltavalle rakenteelle. Muutoksia kuvaan 17 aiheutti seinärakenteen leveys ja sisäpuolisen koolauksen puuttuminen.



Kuva 17. Tuotettu alapohjan liitosdetalji.

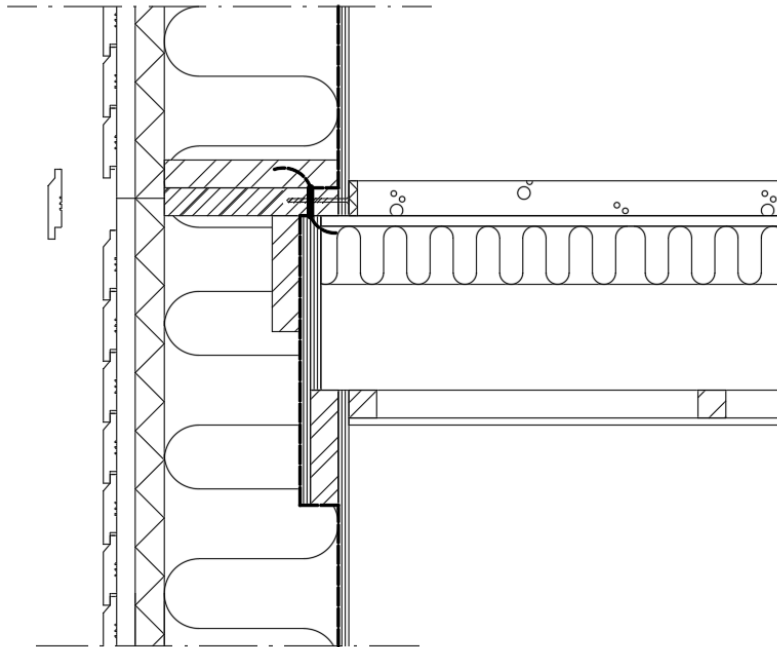
Kuvan 15 liitoksessa ei tarvittu höyrynsulkuna toimivan vanerin vuoksi erillistä puurimaa ilmansulkupaperin puristusliitoksen tekemiseksi. Puristusliitos voidaan toteuttaa yksinkertaisesti työmaalla ruuvaamalla vanereiden alareunat kiinni alaohjauspuuhun riittävän tiheällä ruuvijaolla.

Eristetilan paksuuden vuoksi alaohjauspuu voidaan joutua toteuttamaan kahdesta puusta. Elementin alajuoksussa voitaisiin mahdollisesti käyttää myös esimerkiksi ohuempaa vaneria, jolloin sitä ei tarvitsisi toteuttaa kahdesta puusta. Lisäksi alaohjauspuun tulee olla hieman elementin alajuoksua kapeampi asentamisen helpottamiseksi. Tästä syntyvää ilmarakoa ei kyetä täyttämään, sillä mineraalivilla tuulensuojalevyn tulee

olla asennettuna käytettäessä puhalluseristettä seinärakenteessa. Ilmaraon vaikutusta alaohjauspuuhun tulisi tarkastella, mutta siihen ei tässä työssä otettu kantaa.

4.1 Välipohjan liitosdetalji

Välipohjan liitoksen suunnittelussa haluttiin pitää välipohjaelementin käyttö mahdollisena. Lisäksi ajatus ”muovittomasta” rakenteesta esti solumuovieristeiden käytön välipohjapalkkien välissä kuvan 18 rakenteessa. Rakenteessa huomioitiin mahdollinen kondenssiriski mahdollisimman pienellä välipohjan sisennyksellä, joka voidaan toteuttaa kannattamalla ylempi seinäelementti alemman seinäelementin päältä. Kondenssiriski tulisi tarkastaa laskennallisesti riippuen kuinka syvältä seinäelementistä välipohja joudutaan kannattamaan.



Kuva 18. Tuotettu välipohjan liitosdetalji.

Kannatustavan vuoksi runkorankoja joudutaan loveamaan, joka aiheuttaa lisätyötä elementtien tuotantoon. Tämän ansiosta kuitenkin ilmansulkupaperi voidaan sijoittaa kulkemaan sisäpuolen lovessa välipohjaa kannattelevan palkin alapuolella, jolloin se ei vaurioidu välipohjan asennuksesta tai sen mahdollisista liikkeistä. Myös ylemmän elementin ilmansulkupaperi paperia on pyritty suojaamaan asennuksen aikaisilta vaurioilta viemällä se alajuoksun ja sen alapuolisen puuriman välistä. Ilmansulkupaperin elementtien välinen liitos voidaan toteuttaa puristusliitoksella, jossa vanerin alareuna ja alajuoksun alapuolinen puurima ruuvataan riittävän tiheällä ruuvi jaolla kiinni alemman seinäelementin yläjuoksuun.

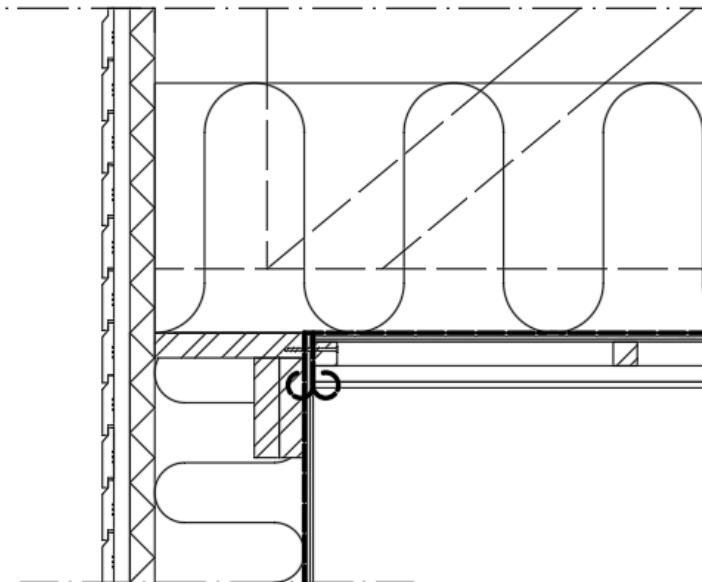
Runkorankojen sisäpuoleiseen loveen on sijoitettu myös 18 mm vaneri, jonka tehtävä on jatkaa höyrynsulkukerros välipohjan yli. Välipohjapalkkien päällä oleva vaneri yhdistää alemman ja ylemmän elementin höyrynsulkukerrokset. Höyrynsulkukerroksen tiiveyttä tulisi tarkastella vielä laskennallisesti etenkin välipohjan yläreunassa, jossa höyrynsulkuvanerit eivät limity.

Seinäelementtien sauma katkaisee myös tuulensuojan. Tuulensuojan sauma tulee tiivistää huolella, jotta vältetään elementin yläjuoksun ja ylemmän elementin alajuoksun sauman kohdistuvilta suurilta tuulen aiheuttamilta konvektiovirroilta. Tuulensuojan osalta tulee varmistua myös, että sen lämpöä eristävät ominaisuudet eivät kärsi asennustyöstä saumakohdalla, sillä elementtien ylä- ja alajuoksut toimivat kylmäsiltoina rakenteen läpi.

Samat tuulensuojan ominaisuudet tulee varmistaa, jos elementtiin joudutaan tekemään eristeiden mahdollisen painumisen vuoksi lisätäyttöä. Lisätäyttö voidaan toteuttaa irrottamalla tarvittava määrä ulkoverhouspaneeleita ja tekemällä täyttöreikiä tuulensuojalevyyn runkorankojen väliin. Täyttöreian tukkimisessa tulee varmistaa tuulensuojan tiiveys.

4.2 Yläpohjan liitosdetalji

Kuvan 19 yläpohjaliitoksessa jouduttiin soveltamaan alaluvussa 3.4 esitettyjä ilmansulun liittämistapoja seinän erilaisen rakenteen vuoksi. Tapoja muokattiin siten, että samaa tapaa voitiin soveltaa sivu- ja päätyseinissä.



Kuva 19. Tuotettu kuva yläpohjaliitoksesta.

Alapohjaliitoksen tapaan yläpohjaliitoksessakin hyödynnettiin ilmansulun liittämisessä höyrynsulkuna toimivaa vaneria. Vanerin tulee olla ulkoseinässä ylös asti kiinnitetty käytettäessä puhalluseristeitä. Huomioitavaa on kuitenkin, että ulkoseinällä olevan vanerin

reuna tulee olla hieman alempana kuin ulkoseinän yläohjauspuu, jotta ilmansulkupaperi ei vaurioidu ristikkonippujen asennuksesta tai niiden liikkeistä. Kuvan 19 ratkaisulla voidaan ilmansulkupaperi helposti kääntää vanerin ympäri alaspäin seinällä. Katolta tuotu ilmansulkupaperi lasketaan myös ulkoseinän vanerin sisäpintaan.

Ratkaisussa ei tarvita erillistä puurimaa ilmansulkupapereiden puristusliitokseen, sillä se voidaan tehdä helposti ensimmäisellä alaslaskurimalla. Alaslaskurima puristetaan höyrynsulkuvaneriin ja elementin yläjuoksuun riittävän tiheällä ruuvi jaolla. Päätyseinillä joudutaan käyttämään erillistä puurimaa, sillä alemmalla alaslaskurimalla puristettaessa puristuksen vastakappaleena olisi vain 18 mm vaneri seinäelementin yläohjauspuun ollessa ylemmän alaslaskuriman tasolla.

Alaslaskurimojen ristiinkoolaus yläpohjaan mahdollistaa sähköjohtojen ja -putkien tuomisen alaslaskuun helpommin seinäelementistä. Sähköputket täytyy viedä ulkoseinän kuormaa jakavien palkkien läpi, sillä niiden sijoittaminen ulkoseinän ulkopintaan loisi alaluvun 3.3 mukaisen kondenssiriskin. Lisäksi ristiinkoolaus helpottaa johtojen kuljettamista alaslaskussa, kun alaslaskun yläpuolella on kova vaneri. Vaneri höyrynsulkuna yläpohjassa mahdollistaa harvemman koolausvälin alaslaskurimoille, sillä sen avulla voidaan kannattaa yläpohjan puhalluseristetteitä. Tällöin alaslaskurimojen määrä säilyy lähes samana verrattuna tiheämmällä jaolla toteutettuun. Kuitenkin huonona puolena huonekorkeus pienenee.

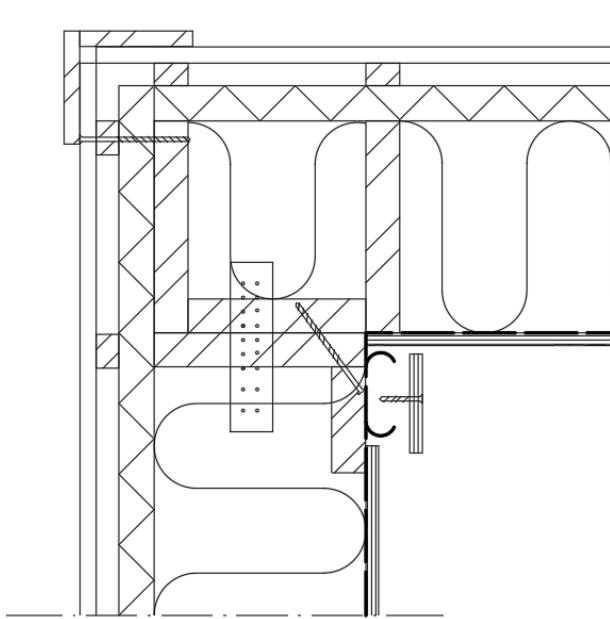
Eristeiden painuessa ulkoseinässä tulee tehdä alaluvun 4.2 tapaan lisätäyttö. Se voidaan toteuttaa samoilla periaatteilla.

4.3 Nurkkien liitosdetaljit

Ulko- ja sisänurkkien tapauksissa tuotetut liitosdetaljit tarvitsevat laskentatarkastelua, sillä alaluvun 3.5 tutkimuksessa ei esitetty runkorakenteiden sijoittelu mallia, jotka toimisivat vielä vuoden 2100 ilmastossa. Tuotetuissa kuvissa on kuitenkin hyödynnetty tutkimuksen perusteella annettuja yleisiä ohjeita.

4.3.1 Ulkonurkka

Ulkonurkan tapauksessa liitosdetalji mukailee alaluvussa 3.5 esitettyjä vielä vuoden 2050 ilmastossa toimivia ratkaisuja. Liitokseen jouduttiin tekemään kuitenkin joitain muutoksia ulkoseinän rakenteellisten erojen vuoksi.



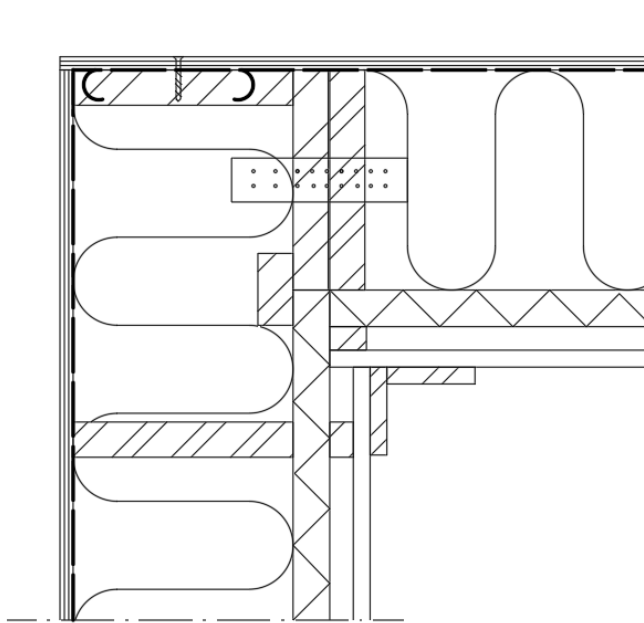
Kuva 20. Tuotettu kuva ulkoseinien ulkonurkasta.

Ilmansulkupaperin limittäminen ilman työmaalla tehtävää työtä olisi mahdotonta. Tämän vuoksi kuvan 20 ratkaisuun on lisätty yksi ylimääräinen tolppa, joka mahdollistaa ilmansulkupapereiden limityksen. Kyseinen tolppa pitää myös puhalluseristeet seinän sisällä ennen vanerin asennusta.

Kuvassa 20 alemman elementin ilmansulkupaperi tuodaan elementin päähän asti. Ylemmän elementin ilmansulkupaperiin jätetään häntä, joka käännetään asennuksen yhteydessä alemman elementin ilmansulkupaperin päälle. Ilmansulkupaperit tiivistetään puristusliitoksella asentamalla riittävän tiheällä ruuvijaolla vanerisoiro nurkkaan. Vanerisoiro yhdistää myös elementtien höyrynsulkukerroksen.

4.3.2 Sisänurkka

Sisänurkan tapauksessa alaluvussa 3.5 oli esitelty vain yhdenlainen ratkaisu, joka todettiin toimimattomaksi kyseisellä rakenteella. Kuvan 21 ratkaisussa on pyritty alaluvussa 3.5 esitetyn ohjeen mukaan välttämään korkean diffuusiovastuksen omaavan kotelon muodostumista lämmöneristeen kylmälle puolelle.



Kuva 21. Tuotettu detaljikuva sisänurkkaliitoksesta.

Ratkaisussa korkean diffuusiovastuksen omaavan kotelon syntyminen on estetty siirtämällä nurkan toista runkorankaa pois päin vasemmanpuoleisen elementin nurkasta. Runkorankaa ei voida kuitenkaan viedä liian pitkälle nurkasta, jotta tuulensuojalevyn pää säilyy riittävän tukevana ja ulkoverhouspaneelien päät saadaan kiinnitettyä. Tuulensuojalevyn pään kiinnittämiseksi on vasemmanpuoleiseen elementtiin asennettu myös ylimääräinen tolppa, joka ei kuitenkaan sulje koteloa.

Kuvan 21 ratkaisussa ilmansulkupaperi voidaan limittää vasemmanpuoleisen elementin päädyssä. Ilmansulkupaperi käännetään vasemmanpuoleisessa elementissä päätyyn. Oikeanpuoleisessa elementissä ilmansulkupaperi viedään vanerin päätyyn asti. Työmaalla elementtejä asennettaessa voidaan tehdä puristusliitos limittyneisiin ilmansulkupapereihin, kun vaneri ruuvataan riittävän tiheällä ruuvijaolla päätyrankaan kiinni. Ruuvit kiristävät myös höyrinsulkuvanerin kiinni vasemmanpuoleisen elementin höyrinsulkuvanerien päähän

5. YHTEENVETO

Rakennukselle syntyy sääolosuhteista riippuen erilaisia rasituksia. Rakenteiden pitkäaikaiskestävyyden kannalta merkittävimiksi rasituksiksi osoittautui kosteusrasitukset. Kosteusrasitukset mahdollistavat mikrobikasvustolle otolliset olosuhteet. Kosteus kulkeutuu rakenteisiin erilaisten ilmiöiden kuten kapillaarisuuden, vesihöyryn diffuusion ja sen konvektion avulla. Kapillaarisesti kosteus kulkeutuu rakenteisiin rakennusmateriaalien huokosverkostojen pitkin pintajännityksen avulla. Vesihöyrypitoisuuksien epätasapaino puolestaan aiheuttaa vesihöyryn diffuusiovirran, joka mahdollistaa oikeissa olosuhteissa kosteuden kondensoituminen rakenteen sisälle. Monille rakenteille kuten yläpohjalle erittäin merkittäväksi osoittautui vesihöyryn konvektiovirta, jota eteenpäin ajaa lämpötila- ja paine-erot. Paine-erojen aiheuttajiksi nimettiin rakennuksen ilmastointi, tuuli ja rakennuksen sisäilman savupiippuvaikutus.

Lukuun ottamatta kylmäsiltojen aiheuttamia kondenssiriskejä lämmön kulkeutuminen rakenteeseen ei vaikuttanut olevan rakenteiden pitkäaikaiskestävyyden kannalta niin merkittävässä asemassa kuin kosteuden. Rakenteisiin kulkeutuva lämpö oikeastaan paransi kosteusolosuhteita rakenteissa. Lämmön kulkeutumista rakennuksen vaipan läpi tulee kuitenkin estää energiatehokkuuden vuoksi. Lämpö voi liikkua rakenteessa johtumalla, säteilemällä ja konvektiovirtojen mukana. Johtumalla liikkuva lämpö liikkuu aineen värähtelevien molekyylien välisten törmäysten seurauksena. Lämpösäteilyssä kuuma kappale emittoi energiaa kuljettavaa sähkömagneettista säteilyä ympäristöönsä.

Rakenteiden kosteusvaurioita voidaan estää erilaisilla valinnoilla ja rakenneratkaisuilla. Näillä voidaan vaikuttaa myös rakenteiden energiatehokkuuteen. Luvun 3 tutkimuksia ja malliratkaisuja läpikäytessä esiin nousi erityisiä riskikohtia eri elementtien liitoksille. Näiden lisäksi kaikkien liitosten kannalta tärkeää on viedä ilman- ja höyrynsulku tiiviisti liitosten yli.

Alapohjan tapauksessa merkittäväksi osoittautui myös alaohjauspuun kosteustekninen toiminta, jota voidaan parantaa paremmalla lämmöneristyksellä käyttäen esimerkiksi lämpöä eristävää tuulensuojalevyä, solumuovikaistaa sen alla ja siirtämällä perusmuurin lämmöneriste sen ulkopintaan.

Välipohjaliitoksen kannalta tärkeää oli höyryn- ja ilmansulkukerroksen sijoittaminen ja tiivistäminen. Ilman- ja höyrynsulku kerrokset tulee sijoittaa mahdollisimman lähelle rakenteen sisäpintaa kondenssiriskin estämiseksi. Näiden sijoitteluun voidaan vaikuttaa esimerkiksi välipohjan ja ylemmän ulkoseinäelementin kannatustavan valinnalla.

Rakennuksen yläosassa vallitsee ylipaine, jonka vuoksi yläpohjaliitokselle erityisen tärkeää on ilmansulkukerroksen tiivistäminen. Tällä hallitaan yläpohjaan tapahtuvia konvektiovirtoja. Ilmansulun tiivistämisen lisäksi yläpohjan olosuhteita voidaan parantaa tuuletustilan sopivalla 0,5–1 1/h tuuletuksella, lämpöä eristävällä aluskatteella ja hygroskooppisen eristemateriaalin valitsemisella.

Nurkkaliitosten tapauksessa tarkastellun tutkimuksen perusteella voitiin antaa vain kaksi yleisesti toimivaa ohjetta. Ensinnäkin ulkoseinien nurkkaliitoksissa tulee välttää tilanetta, jossa sisäpuolisen koolaus- ja lämmöneristekerroksen taakse viety höyrynsulkukalvo on suoraan kylmäsiirtimen toimivan puurangan kautta kytköksissä ulkoilmaan. Toiseksi tulee välttää puurangan asettamista nurkka-alueella lämmöneristekerroksen ulkopintaan siten, että lämmöneristeen kylmälle puolelle muodostuu suuren diffuusiovastuksen omaava umpinainen kotelo.

Tutkimuksen tarkoituksena oli tuottaa pientalon ulkoseinän yleisimmistä liitoksista detailj kuvat käyttäen kuvan 7 ulkoseinärakennetta. Detailj kuvat piirrettiin luvussa 3 esitettyihin malliratkaisuihin ja tutkimuksiin pohjautuen. Luvun 3 malliratkaisuja ja tutkimuksia oli yleisesti vaikea soveltaa tarkasteltavalle rakenteelle, sillä niissä esitetyt seinärakenteet olivat hyvin erilaisia kuin tarkastelussa ollut rakenne.

Luvussa 3 tarkastellut rakenteet olivat perinteisiä höyrynsulkumuovilla, mineraalivilla eristeellä varustettuja rakenteita. Kuvan 7 rakenteessa taas höyrynsulkuna käytettiin vaneria, ilmansulkuna ilmansulkupaperia ja eristeenä sahanpuru- ja kutterinlastueristettä. Lisäksi kaikissa luvun 3 tarkasteluissa ei käytetty lämpöä eristävää tuulensuojaa. Nämä tekijät muuttavat rakenteiden kosteusteknistä käyttäytymistä oleellisesti, sillä sahanpuru- ja kutterinlastueristeen kosteuskapasiteetti on mineraalivillaa korkeampi. Lisäksi ilmansulkupaperin ja vanerin yhdistelmän vesihöyrynläpäisevyys on höyrynsulkumuovia korkeampi. Kuvan 7 rakenne on siis diffuusioavoin, kun taas luvun 3 rakenteet eivät.

Edellä mainittujen syiden vuoksi luvussa 4 tuotettujen detailjikuvien ei voida sanoa olevan suoraan käyttökelpoisia, vaan ne tarvitsevat vielä esimerkiksi laskennallista tarkastelua. Lisäksi detailjien piirtämisessä ei otettu tarkemmin kantaa esimerkiksi paloturvallisuuteen, jäykistykseen tai kantavuuteen.

LÄHTEET

Aho, H. & Korpi, M. (2009). Ilmanpitävien rakenteiden ja liitosten toteutus asuinrakennuksissa. Tutkimusraportti. Tampereen teknillinen yliopisto. Saatavissa (viitattu 2.4.2022): <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-2011122914973>

Forss, A. (2020). Kutterinlastu- ja purueristeiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta nykyisissä ja tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa. Diplomityö. Tampereen yliopisto. Saatavissa (viitattu 27.1.2022): <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202012219038>

Hagentoft, C.-E. (2001). Introduction to Building Physics. Lund: Studentlitteratur.

Lahdensivu, J., Suonketo, J., Vinha, J., Lindberg, R., Manelius, E., Kuhno, V., Saastamoinen, K., Salminen, K. & Lähdesmäki, K. (2012). Matalaenergia- ja passiivitalojen rakenteiden ja liitosten suunnittelu- ja toteutusohjeita. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-2951-1>

Laukkarinen, A. (2021a). L4 Lämpö ja lämmön johtuminen. Luentomoniste. RAK.RS.240 Rakennusfysiikan perusteet. Tampere: Tampereen yliopisto. Saatavissa (viitattu 7.2.2022): https://moodle.tuni.fi/pluginfile.php/1933826/mod_resource/content/3/RAK.RS.240%20L4%20L%C3%A4mp%C3%B6%20ja%20L%C3%A4mm%C3%B6n%20johtuminen.pdf

Laukkarinen, A. (2021b). L5 Kostean ilman ominaisuudet, kosteus materiaalissa. Vesihöyryn diffuusio ja diffuusiovirran kondenssi. Luentomoniste. RAK.RS.240 Rakennusfysiikan perusteet. Tampere: Tampereen Yliopisto. Saatavissa (viitattu 7.2.2022): https://moodle.tuni.fi/pluginfile.php/1947663/mod_resource/content/5/RAK.RS.240%20L5%202021-10-07.pdf

Moisio, T. (2020). Puurankarunkoisten ulkoseinien liitosten lämpö- ja kosteustekninen toiminta. Diplomityö. Tampereen yliopisto. Saatavissa (viitattu 15.3.2022): https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/1j3mh4m/alma9911270166905973

MRL 1010/2017. Maankäyttö- ja rakennuslaki. Saatavissa (viitattu 11.3.2022): <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010>

Nilsson, L.-O. (2018) Methods of Measuring Moisture in Building Materials and Structures. Springer International Publishing AG. Saatavissa (viitattu 3.3.2022): <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=6303108>

Pentti, M. & Hyypöläinen, T. (1999) Ulkoseinärakenteiden kosteustekninen suunnittelu. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Saatavissa (10.3.2022): https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/1j3mh4m/alma9911268325905973

Pinteric, M. (2017) Building Physics: From Physical Principles to International Standards. Springer International Publishing AG. Saatavissa (viitattu 14.2.2022): <https://link.springer-com.libproxy.tuni.fi/book/10.1007/978-3-319-57484-4>

RIL 250-2011. (2011) Kosteudenhallinta ja homevaurioidenestäminen. Helsinki. Suomen rakennusinsinöörien liitto.

RIL 250-2020. (2020) Kosteudenhallinta ja homevaurioidenestäminen. Helsinki. Suomen rakennusinsinöörien liitto.

Sisäilmayhdistys ry. Ilmavirtaukset rakennuksessa. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.2.2022): <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekninen-toiminta/Ilmavirtaukset-rakennuksessa>

Thirumaleshwar, M. (2006). Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Pearson India. Saatavissa (viitattu 20.2.2022): https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/1j3mh4m/alma9910688815005973

United Nations Environment Programme (2021). 2021 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Saatavissa (viitattu 15.2.2022): https://globalabc.org/sites/default/files/2021-10/GABC_Buildings-GSR-2021_BOOK.pdf

Viljakainen, M. & Lahtela, T. (2019). Rakentamisen hiilijalanjälkivertailu. Puuinfo. Loppuraportti. Saatavissa (viitattu 27.2.2022): <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/RAKENTAMISEN-HIILIJALANJ%C3%84LKIVERTAILUN-LOPPURAPORTTI.pdf>

Vinha, J. & Käkelä, P. (1999). Vesihöyryn siirtyminen seinärakenteissa diffuusion ja konvektion vaikutuksesta. Tampereen teknillinen korkeakoulu. saatavissa (viitattu 26.4.2022): https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/1j3mh4m/alma9911265929905973

Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T. et al. (2013). Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset. Tampere University, Rakennustekniikan laitos. Saatavissa (viitattu 4.4.2022): https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/1j3mh4m/alma9911268606305973

Vinha, J., Lähdesmäki, K., Heljo, J., Pentti, M., Suonketo, J. & Åström, G. (2014). RIL 255-1-2014 RAKENNUSFYSIKKA 1. Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin liitto Ry.

Vinha, J. & Raunima, T. (2021). Rakennusfysiikka 2021. Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut: 26.–28.10.2021, Tampere. Seminaarijulkaisu 7 - Osa 1. Tampereen yliopisto. Seminaarijulkaisu. Saatavissa (viitattu 24.3.2022): https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/136624/2019_osa_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y