



samk



Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

TIIA-LIISA HAAPALA

Ilmastonmuutos ja puukerrostalon ulkoseinä- ja alapohjarakenteet

RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIIKAN
TUTKINTO-OHJELMA
2023

TIIVISTELMÄ

Haapala Tiia-Liisa: Ilmastonmuutos ja puukerrostalon ulkoseinä- ja alapohjarakenteet

Opinnäytetyö, AMK

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma

Huhtikuu 2023

Sivumäärä: 72

Ilmastonmuutos on nykyisin todellisuutta ja se aiheuttaa erityisesti puurakentamiseen monia haasteita. Ilmastonmuutoksen hidastamiseen rakentamisen sektorilla pyritään vähentämällä rakennusten energian käyttöä ja lisäämällä rakennusten hiilinieluja. Hiilinielujen kasvattaminen onnistuu puurakentamisen avulla ja energian kulutuksen vähentäminen muun muassa rakennusten ulkovaipan eristystä parantamalla. Puu on rakennusmateriaalina kuitenkin erittäin herkkä vaurioitumaan kosteuden vaikutuksesta. Ilmastonmuutoksen myötä Suomen ilmastossa sateet lisääntyvät ja talvet muuttuvat lämpimämmiksi. Sään aiheuttamat rasitukset rakenteille tulevat lisääntymään. Lisäksi paksu eristekerros luo haasteita erityisesti ulkoseinien kosteustekniselle toiminnalle. Puukerrostalon suunnitteluun vaikuttavat paljon myös palomääräykset, joita opinnäytetyössä avattiin lyhyesti niiltä osin kuin ne vaikuttavat materiaalivalintoihin.

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin, miten puukerrostalon ulkoseinä- ja alapohjarakenteiden kosteusteknistä toimivuutta voitaisiin parantaa. Tutkimus tehtiin kuvailevana kirjallisuusanalyysinä, joten saadut tulokset perustuvat aiempiin tutkimuksiin ja ohjeistuksiin. Kirjallisuudesta löytyneiden tutkimustulosten, ohjeiden ja säädösten perusteella tehtiin esimerkkirakennetyyppejä, jotka piirrettiin AutoCad -ohjelmalla. Rakenteet ovat tavanomaisia puukerrostalon ulkoseinä- ja alapohjarakenteita, jolloin niiden kosteusteknistä toimintaa pystyttiin arvioimaan aiheesta tehdyn tutkimuksen ja kirjallisuuden perusteella. Rakenteiden kosteustekniikkaa ei tutkittu laskennallisesti, eikä simuloimalla. Kosteusteknisen toiminnan havainnollistamiseen käytettiin DOF-lämpö -ohjelmistoa. Tutkimuksen perusteella tehtyjen esimerkkirakennetyyppien lisäksi pohdittiin puurakentamisen pitkäaikaiskestävyyttä, jota joillakin rakennuspaikoilla voidaan pidentää käyttämällä rakenteissa jonkin verran betonia. Tämän kaltainen rakennusmateriaalien yhdistely lisää hiilinieluja ja mahdollistaa rakennukselle pitkän käyttöiän.

Avainsanat: Ilmastonmuutos, Puukerrostalo, Puurakentaminen, Puurakenteet, Alapohja, Ulkoseinä, Tuulettuva alapohja, Maanvarainen alapohja, Julkisivuverhoilu

Abstract

Haapala Tiia-Liisa: Climate change and the exterior wall and base floor structures of a wooden apartment building

Bachelor's thesis

Programme for Construction and Municipal Engineering

April 2023

Number of pages: 72

Climate change is a reality nowadays and it poses many challenges, especially with wood construction. The construction sector aims to slow down climate change by reducing the energy consumption of buildings and by increasing carbon sinks in buildings. The increase in carbon sinks can be accomplished with wood construction and the energy consumption can be reduced for example by improving the insulation of the outer building envelope. However, wood as a construction material is very sensitive for damage caused by moisture. Due to climate change, the Finnish climate will experience more rain than before, and winters will become warmer. The stress caused to the structures due to the weather will increase. Furthermore, a thick insulation layer will pose challenges to the technical functionality as regards to moisture. The designing of a wooden apartment building is also greatly affected by fire regulations, which have been discussed shortly in this thesis insofar as they affect the material choices.

This thesis examined the ways in which the technical functionality of the exterior wall and base floor structures of a wooden apartment building as regards to moisture could be improved. The study was conducted as a descriptive literature analysis, so the results are based on previous studies and directions. Based on the research results, directions and regulations found from the literature, structure type examples were created and drawn with AutoCad software. The structures are conventional exterior wall and base floor structures of a wooden apartment building, which made it possible to evaluate their technical functionality as regards to moisture based on the conducted study and the literature. The moisture technology of the structures was not studied with calculations or simulations. DOF-Lämpö software was used to demonstrate the moisture technical functionality. In addition to the structure type examples created based on the study, long-term sustainability of wood construction was discussed. This could be improved in some building sites by using some concrete in the structures. Such combination of construction materials creates more carbon sinks and enables a long lifetime for a building.

Keywords: climate change, wooden apartment building, wood construction, wood structures, base floor, exterior wall, base floor with a crawl space, slab-on-ground foundation, façade cladding

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	6
2 ILMASTONMUUTOS JA PUURAKENTAMINEN	8
3 TUTKIMUSTAVOITTEET JA -MENETELMÄ	12
4 PUUKERROSTALOT SUOMESSA	14
4.1 Paloturvallisuus	15
4.2 Runkorakennejärjestelmät	17
4.3 Insinööripuutuotteet	19
4.3.1 CLT-massiivipuulevy	20
4.3.2 LVL eli viilupuu	21
4.3.3 Liimapuu	22
5 RAKENNUSFYSIKKA	23
5.1 Kosteuslähteet ja kosteuden siirtyminen	25
5.2 Rakennuksen paine-erot	28
5.3 Puun materiaaliominaisuudet	31
6 ULKOSEINÄRAKENNE	33
6.1 Julkisivuverhoilut	34
6.1.1 Maalattu puuverhoilu	34
6.1.2 Tiiliverhoilu	36
6.1.3 Levyrapattu ulkoverhoilu	38
6.1.4 Metalliverhoilu	39
6.2 Tuuletusväli	39
6.3 Tuulensuojalevy	40
6.4 Lämmöneristeet	41
6.5 Höyryn- ja ilmansulku	42
6.6 Sisä- ja pintaverhoilu	44
7 ALAPOHJARAKENTEET	45
7.1 Maanvastainen alapohja	45
7.2 Tuulettuva alapohja	47
8 ESIMERKKIRAKENTEET	52
8.1 Ulkoseinät	53
8.1.1 Rankarunkoiset ulkoseinät	54
8.1.2 Massiivipuurunkoiset ulkoseinät	57
8.2 Alapohjat	59
8.2.1 Maanvastainen alapohja	60
8.2.2 Tuulettuvat alapohjat	61

9 POHDINTA	63
10 YHTEENVETO.....	65
LÄHTEET.....	67
LIITE 1	72

1 JOHDANTO

Opinnäytetyössä tutkitaan, miten puukerrostalon alapohja- ja ulkoseinärakenteiden kosteusteknistä toimivuutta voitaisiin parantaa tulevaisuuden ilmastossa. Aiheen taustalla on ilmastonmuutos, jonka hillitsemiseksi pyritään löytämään keinoja muun muassa rakentamisen sektorilla. Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi pitää lisätä hiilineutraalia rakentamista ja pienentää rakennusten energiankulutusta. Energiankulutuksen vähentämiseen päästään muun muassa lisäämällä lämmöneristeen paksuutta vaipparakenteissa. Puurakentamisen lisääminen on puolestaan yksi keino päästä lähemmäs hallituksen tavoitetta tehdä Suomesta hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. Kasvaessaan puu sitoo itseensä ilman hiilidioksidia. Tämän vuoksi puurakenteet toimivat hiilinieluina. Puurakenteet pysyvät hiilinieluina, jos rakenne säilyy pitkään terveenä, eikä puurunko pääse esimerkiksi lahoamaan. Ilmastonmuutoksen vuoksi Suomen ilmasto on muuttumassa kosteammaksi ja lämpimämmäksi. Lisäksi rakenteiden lämmöneristepaksuudet ovat kasvaneet. Nämä seikat aiheuttavat puurakenteille suurempia haasteita kosteusteknisen toimivuuden kannalta, ja näitä haasteita on tärkeää pystyä hallitsemaan.

Puurakentamisen toivotaan yleistyvän tulevaisuudessa. Puurakenteiden rakennesuunnittelu ja tuotanto eivät kuitenkaan ole vielä yhtä standardisoitunutta kuin esimerkiksi betonielementtirakentaminen. Monet tahot, kuten esimerkiksi PuuInfo, tekevät työtä standardoimisen lisäämiseksi ja valmiiden suunnitteluratkaisuiden tuottamiseksi. Vaikka standardoimisen lisääminen on kehittänyt puurakennusjärjestelmiä viime vuosina nopeasti, työ ei kuitenkaan ole vielä valmis. Puurakenteiden suunnitteluosaaminen tulee korostumaan tulevaisuudessa. Näiden seikkojen vuoksi opinnäytetyön aihe rajautui juuri puukerrostalon rakenteisiin.

Työn tilaaja on Sitowise Oy, jonka toiminta keskittyy talo- ja infrasuunnittelun lisäksi myös digitaalisiin ratkaisuihin. Yritys työllistää noin 2 200 eri alojen asiantuntijaa. Sitowisen pääkonttori on Espoossa ja sillä toimipisteitä ympäri Suomen, sekä Ruotsissa, Virossa ja Latviassa. (Sitowise Oy, n.d.) Tilaaja haluaa tulla tunnetuksi vastuullisena toimijana, joten puukerrostalojen suunnittelun kehittäminen on heille tärkeää.

Opinnäytetyön seuraavassa kappaleessa kerrotaan taustatietoja ilmastonmuutoksesta ja sen vaikutuksista rakentamiseen, sekä määritellään ilmastonmuutokseen liittyvät oleelliset termit. Lisäksi kerrotaan lyhyesti, miten ilmastonmuutosta voidaan hidastaa rakentamisen sektorilla. Kolmannessa kappaleessa kerrotaan tutkimuksen tavoite, tutkimusongelma ja tutkimuskysymykset. Tutkimusmenetelmänä on laadullinen kuvaileva kirjallisuustutkimus. Kappaleessa kerrotaan tästä menetelmästä ja miten tutkimus toteutettiin sen avulla. Lisäksi kerrotaan tutkimuksen luotettavuuden ja eettisyyden kannalta oleelliset asiat. Neljännessä kappaleessa määritellään, millainen on tyypillinen puukerrostalo Suomessa ja millaiset ovat niiden tyypilliset runkorakenteet. Kappaleessa käydään läpi lyhyesti puukerrostalon paloturvallisuuteen liittyviä asioita ja selvitetään, minkälaisia insinööripuutuotteita suomalaisissa puukerrostaloissa käytetään. Viidennessä kappaleessa käsitellään rakenteen rakennusfysikaalista toimintaa. Aluksi määritellään rakennuksen ulko- ja sisäpuolisen kosteuden lähteet ja muut oleelliset rakennusfysikaaliset termit. Kappaleessa keskitytään ulkoseinä- ja alapohjarakenteiden kosteustekniseen toimintaan ja siihen, miten lämpötila ja kosteus vaikuttavat niihin. Kappaleen lopuksi käsitellään puun materiaaliominaisuudet. Kuudennessä kappaleessa käydään läpi ulkoseinärakenteen rakennekerrokset. Näistä kerrotaan niiden tyypilliset ominaisuudet ja merkitys ulkoseinärakenteelle. Lisäksi kappaleessa esitellään opinnäytetyössä käsiteltävien erityyppisten julkisivuvaihtoehtojen ominaisuuksia. Seitsemännessä kappaleessa käsitellään maanvastaisen alapohjan ja tuulettuvien alapohjien ominaisuuksia ja erityispiirteitä. Kahdeksannessa kappaleessa käydään läpi opinnäytetyössä tehdyn tutkimuksen avulla piirrettyjen esimerkkirakenteiden tyypillisiä piirteitä ja miten ne vaikuttavat rakenteen toimintaan. Lisäksi pohditaan, miten näiden rakenteiden kosteusteknistä toimintaa voitaisiin parantaa tulevaisuuden ilmastossa. Yhdeksännessä

kappaleessa pohditaan puurakentamista ja ilmastonmuutosta yleisesti. Samalla pyritään avaamaan mitä seikkoja puurakennuksen suunnittelussa on huomioitava ilmastonmuutoksen ja ympäristön kannalta. Viimeisessä kappaleessa on yhteenveto opinnäytetyöstä. Siinä pohditaan, mitä jatkotutkimuksia tai toimenpiteitä ilmastonmuutoksen ja puurakentamisen tiimoilta pitäisi tehdä.

2 ILMASTONMUUTOS JA PUURAKENTAMINEN

Ilmasto tarkoittaa keskimääräistä muutaman vuosikymmenen ajalla ilmeneviä ilmakehän lämpö-, sade-, pilvisyys- ja tuuliolosuhteita. Säällä puolestaan tarkoitetaan lyhytaikaisia päivästä kuukauteen kestäviä ilmakehän olosuhteita. Alueiden pinnanmuodot ja rakennettu ympäristö vaikuttavat paikallisesti ilmastoon. Yksittäinen kaupunki vaikuttaa sitä ympäröivään ilmastoon lämmittävästi. Tällaista kaupungin alueelle rajautuvaa ilmastoja kutsutaan paikallisilmastoksi. Lisäksi voidaan puhua mikroilmastosta, jolla tarkoitetaan maanpinnan lähellä ihmisten ja muiden eliöiden koettavissa olevaa pienilmastoja. Mikroilmasto vaihtelee alueellisesti voimakkaasti ja siihen vaikuttaa muun muassa maanpinnan muodot ja rakennetun ympäristön muodot. (RT 103169, 2019, s. 2.) Köppenin maantieteeseen perustuvan ilmastoluokituksen mukaan Suomi kuuluu kosteaan talviseen ilmastoon. Suomen ilmasto on ns. väli-ilmasto. Siinä on merellisiä ja mantereellisia piirteitä, mikä tekee ilmastosta vaihtelevan. Pohjoisin Lappi tekee poikkeuksen ja kuuluu tundraan. Ilmasto on leveysasteisiin nähden leudompi Golfvirran lämmittävän vaikutuksen takia. Suomen ilmastoon kuuluu neljä vuoden aikaa. Säähän liittyvien muutosten lisäksi ilmastonmuutos saattaa vaikuttaa myös merivirtoihin. Tämä vaikeuttaa ilmastonmuutoksen ennustamista pitkällä aika välillä Suomessa. (RT 103169, 2019, s. 2.)

Ilmastonmuutokseen sopeutuminen ja sen hallinta ovat haaste, johon myös rakennussektorin täytyy vastata. Noin kolmannes Suomen kasvihuonekaasupäästöistä aiheutuu rakentamisesta ja rakennusten käytöstä (Huttunen, ym., 2022, s. 22). Ilmastonmuutos tarkoittaa ilmaston lämpenemistä, joka aiheutuu

ihmisen toiminnan seurauksena vapautuvista kasvihuonekaasuista. Kasvihuonekaasuista merkittävin on hiilidioksidi. Ilmastonmuutosta pyritään hillitsemään erityisesti juuri hiilidioksidipäästöjä vähentämällä. (RT 103170, 2020, s. 1-2) Erityisen suuren haasteen päästöjen vähentämiselle luo se, että rakennushankkeessa on useita toimijoita, joilla yksinään ei juurikaan ole mahdollisuutta vähentää päästöjä. Suurimmat päästöihin vaikuttavat päätökset tehdään rakennusprojektin alkupäässä eli kaavoituksessa ja hankesuunnittelussa. Suurimmat päästöt kuitenkin syntyvät loppupäässä eli raaka-aineiden ja rakennusmateriaalien valmistuksessa. (Raivio, ym., 2020, s. 5)

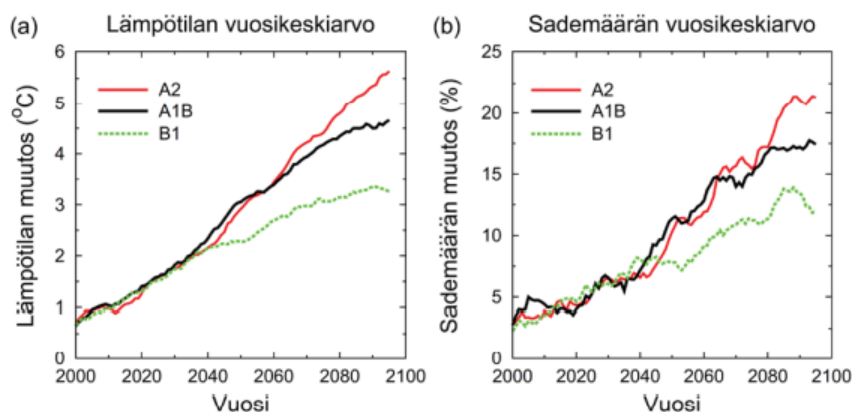
Ilmastovaikutusten vertailua varten on kehitetty hiilijalanjälki- ja hiilikädenjälkilaskenta. Hiilijalanjälki kertoo miten paljon toiminta tai tuote tuottaa hiilidioksidia koko elinkaarensa aikana (RT 103170, 2020, s. 2). Esimerkiksi sementin valmistuksessa ja maankäytönmuutoksissa vapautuneet hiilidioksidipäästöt suurentavat valmiin rakennuksen hiilijalanjälkeä, vaikka pääosa koko rakennuksen hiilidioksidipäästöistä syntyykin käyttövaiheessa. Hiilikädenjälki puolestaan kertoo paljonko toiminta tai tuote on tuottanut positiivisia ilmastovaikutuksia (RT 103170, 2020, s. 2). Rakennusteollisuuden osalta hiilikädenjäljen laskenta on alan monipuolisuuden vuoksi lähes mahdotonta. Ympäristöministeriö on tehnyt hiilikädenjäljen arviointiin luonnostasaisen menetelmän, jossa arvioidaan tuottaako rakennus sellaisia ilmastohyötyjä, joita ei syntyisi ilman rakennusta. Nämä perustuvat esimerkiksi raaka-aineiden kierrätykseen, tontilla tuotettuun uusiutuvaan energiaan ja hiilinieluihin toimiviin rakennusmateriaaleihin. (Raivio, ym., 2020, s. 9-10) Valtioneuvosto julkaisi vuoden 2022 syyskuussa kansallisen ilmasto- ja energiastrategian, jonka tavoitteena on tehdä Suomesta hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. Tavoite perustuu hiilijalanjäljen ja -kädenjäljen vertailuun, jolloin Suomen hiilineutraalius tarkoittaa sitä, että Suomen hiilidioksidipäästöt ovat yhtä suuret kuin hiilinielut. (Huttunen, ym., 2022, s. 23.) Hiilinielut sitovat ilman hiilidioksidia, jolloin hiilidioksidi on pois ilmasta, jossa se estäisi auringon lämmön pois pääsyn maan ilmakehästä. Käytännössä metsät ovat tehokkaimpia hiilinieluja. (RT 103170, 2020, s. 2.)

Rakennussektorin kohdalla valtioneuvoston tavoite hiilineutraalista Suomesta tarkoittaa rakennusten ja rakentamisen energiankulutuksen pienentämistä, mikä koskee erityisesti olemassa olevaa rakennuskantaa. Lisäksi valtioneuvosto on linjannut, että puurakentamisen ja puupohjaisten rakennusmateriaalien käyttöä pitää lisätä. Puutuotteiden käyttö kasvattaa rakennuskannan hiilinielua ja toisaalta alentaa rakentamisesta syntyvää hiilijalanjälkeä. Nämä ovat valtioneuvoston pääasialliset keinot, joilla ilmastonmuutosta pyritään rakennussektorilla hidastamaan. (Huttunen, ym., 2022, s. 144.) Ilmastonmuutosta ei kuitenkaan pystytä enää täysin pysäyttämään, vaan Suomen keskilämpötila tulee nousemaan 3–6 astetta tällä vuosisadalla. Tämän seurauksena kesät pitenevät ja hellejaksot lisääntyvät. Rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden kannalta kriittisintä on kuitenkin talvien muuttuminen leudommiksi ja samalla sateisemmiksi. (RT 103170, 2020, s. 4). Näihin muutoksiin on rakennussektorin vastattava.

Maankäyttö- ja rakennuslaissa (1999/132, 17 luku § 117a mom.) määritellään, että rakennus täytyy suunnitella niin, että sen rakenteet kestävät ja soveltuvat rakennuspaikan olosuhteisiin koko rakennuksen suunnitellun käyttöiän ajan. Samassa laissa on määritelty myös, että rakennuksen koko suunnitellun elinajan ajan sen sisäilman, sekä sisätilojen lämpötilan ja kosteuspitoisuuden pitää olla terveellistä ja turvallista (1999/132, 17 luku § 117c mom.). Rakennusfysikaalisen suunnittelun avulla voidaan osaltaan vastata lain vaatimuksiin. Rakenteiden rakennusfysikaalista suunnittelua voidaan tehdä yleisten ohjeistuksien ja kokemuseräisen tiedon avulla. Kokemuksen perusteella tehtävä suunnittelu soveltuu hyvin tavanomaisten ja tunnettujen rakenteiden suunnitteluun. Mikäli rakenne on kuitenkin epätyypillinen, sen rakennusfysikaalisen toiminnan tarkasteluun tarvitaan laskennallisia tarkasteluja. Niiden avulla saadaan selvitettyä tarkemmin rakenteen kosteus- ja lämpöteknistä käyttäytymistä. (Laukkarinen, ym., 2022, s. 8.) Rakennusfysikaalisten simulointien ja laskennallisten tarkastelujen pohjatietona käytettävien testivuosiin pitää olla valittu niin, että ne kuvaavat rakenteen kosteusteknisen toimivuuden kannalta kriittisimpiä vuosia. Tarkoituksena on löytää sellaiset vuodet, että vähintään 90 prosenttia vuosista ovat vähemmän kriittisiä. Tämä on erittäin tärkeää, koska rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa ei käytetä ulkoilmaolosuhteisiin liittyen

minkäänlaisia varmuuskertoimia. Rakennuksen vaipparakenteiden eli katon, alapohjan ja ulkoseinien, sekä ovien ja ikkunoiden toimivuuden kannalta kriittisimpiä ulkoilmaolosuhteita ovat lämpötila, suhteellinen kosteus, sade, tuuli ja auringon säteily. (Vinha, ym., 2013, s. 67.) Tampereen yliopiston ja Ilmatieteen laitoksen yhteisessä RAMI-tutkimushankkeessa testivuodet valittiin niin, että kaikki rakenteiden kannalta keskeiset ulkoilmaolosuhteet otettiin huomioon. Samoin tutkimuksessa huomioitiin ilmakehästä saapuva rakenteita lämmittävä pitkäaaltoinen säteily. Pitkäaaltoinen säteily on ilmakehässä olevista hiukkasta lähtevää lämpösäteilyä, joka lisääntyy ilmakehässä olevien kasvihuonekaasujen lisääntyessä. Lyhytaaltoisesta säteilystä poiketen pitkäaaltoinen säteily lämmittää rakenteita myös silloin kun aurinkoa ei näy. Pitkäaaltoisen säteilyn määrä tulee kasvamaan samassa suhteessa kasvihuonepäästöjen kanssa. Erityisesti talvikuukausia pitkäaaltoisen säteilyn ennakoidaan lisääntyvän. (Laukkarinen, ym., 2022, s. 67.)

Kuvassa 1 on esitetty ilmastonmuutoksen vaikutukset Suomen lämpötilan ja sademäärien vuosikeskiarvoon. Ennustukset on tehty kolmella erilaisella tulevaisuusskenaariolla. Vihreällä merkitty skenaario B1 on optimistisin. Siinä kasvihuonekaasujen päästöjä on saatu vähennettyä tehokkaasti. Keskimmissä A1B skenaariossa päästöjä on saatu vähennettyä jonkin verran, mutta tavoiteltua hitaammin ja A2 skenaariossa päästöjä ei ole vähennetty ollenkaan. Valitusta skenaariosta huolimatta kuvaajista voidaan nähdä vuosittaisen lämpötilan keskiarvon nousevan samoin kuin sademäärien keskimääräisesti kasvavan. (Vinha, ym., 2013, s. 70)



Kuva 1. Vuotuiset keskilämpötilat ja sademäärät vuosina 2000–2100 (Vinha, ym., 2013, s. 69).

Lämpötilan nousu yhdessä sademäärien kasvamisen kanssa aiheuttavat homeen kasvulle ja kosteuden kondensoitumiselle paremmat olosuhteet. Rakenteiden kuivumiskyky tulee heikentymään, koska sadepäivien väliset poutajakotot lyhenevät ja pilvisyyden ennustetaan kasvavan. Tuulisuus tulee myös lisääntymään jonkin verran, mikä puolestaan voimistaa kosteuden siirtymistä ulkoa rakenteen sisäosia kohti. Erityisesti tämä ongelma tulee ilmi julkisissa, jotka ovat alttiina viistosateille. (Vinha, ym., 2013, s. 69)

3 TUTKIMUSTAVOITTEET JA -MENETELMÄ

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää, miten puurakenteisen kerrostalon alapohja- ja ulkoseinärakenteet saadaan rakennusfysikaalisesti toimiviksi muuttuvassa ilmastossa. Ulkoseinä- ja alapohjarakenteet rajataan tavanomaisiksi, joten työssä ei tehdä tarkempia mitoituslaskelmia eikä -simulointeja. Konkreettisia ohjeita ja suosituksia siitä, miten rakenteita voitaisiin parantaa niin, että ne kestäisivät paremmin ilmastomuutoksen aiheuttavat rasitukset, pyritään löytämään kirjallisuudesta. Tarkoituksena on selvittää, miten ilmastomuutos vaikuttaa alapohja- ja ulkoseinärakenteisiin, millaisilla suunnitteluratkaisuilla saadaan rakennusfysikaalisesti toimiva rakenne ja millaisia materiaaleja olisi hyvä käyttää. Näiden tietojen pohjalta tehdään toimivia esimerkkirakennetyyppejä erilaisille alapohjaratkaisuille ja eri tavoin verhoilluille ulkoseinärakenteille. Esimerkkirakenteet suunnitellaan täyttämään nykyisten lakien ja asetusten vaatimukset.

Laadullisen eli kvalitatiivisen tutkimusotteen avulla pyritään ymmärtämään tutkittavan ongelman laatua, ominaisuuksia ja merkityksiä kokonaisvaltaisesti. Laadullinen tutkimus perustuu kielellisen aineiston analysointiin ja ymmärtämiseen. (Jyväskylän yliopisto, 2021) Kuvaileva kirjallisuustutkimus on laadullisen tutkimuksen menetelmä, jossa pyritään keräämään yhteen ja analysoimaan tieteellisistä lähteistä saatua tietoa. Arja Kunnela Jyväskylän ammattikorkeakoulusta (2022) määrittelee, että kuvailevat kirjallisuustutkimukset "kertovat tai

kuvaavat aiheeseen liittyvää aiempaa tutkimusta, sen laajuutta, syvyyttä ja määrää”. Kirjallisuustutkimuksen lähteitä ovat muun muassa kirjat, tieteelliset ja alan lehtien artikkelit, sekä tieteellisten tutkimusten raportit. Kirjallisuustutkimuksen tavoitteena on arvioida kriittisesti kerättyjä tietoja ja löytää niiden avulla ratkaisu tutkimusongelmaan. (Scribbr, n.d.)

Kirjallisuustutkimuksen kulku voidaan jakaa neljään eri vaiheeseen, joista ensimmäinen on valmistelu. Valmisteluvaiheessa tutustutaan tutkittavaan aiheeseen tuoreimpien tutkimusten tai artikkeleiden avulla. Lisäksi selvitetään tutkimusongelmaan liittyvät keskeisimmät käsitteet eli avainsanat. Toisessa vaiheessa kerätään kirjallisuutta edellisen vaiheen avainsanojen avulla. Kirjallisuutta haetaan kirjastoista ja esimerkiksi tietokannoista, joiden materiaalit ovat tieteellisesti tuotettuja. Osa kerätystä kirjallisuudesta olisi hyvä olla esimerkiksi englannin tai ruotsin kielistä. Lisää lähdekirjallisuutta voi löytää aiemmin löydetyn kirjallisuuden lähdeluetteloista. Kolmannessa vaiheessa arvioidaan, onko löydetty kirjallisuuslähde relevanssi eli sopiiko se tutkimusongelmaan hyvin vai ei. Arviointi tapahtuu nopeasti lukemalla vain johdanto tai yhteenveto. Sen perusteella valitaan tutkimusongelman kannalta oleellisin aineisto. Valitun aineiston pitää olla laadukasta eli tieteellisesti tuotettua ja luotettavaa. Viimeisessä eli neljännessä vaiheessa läpi käyty kirjallisuus analysoidaan huolellisesti. Kirjallisuuden analysoinnissa kiinnitetään huomiota, miten keskeiset käsitteet on määritelty ja miten kyseistä lähdettä voisi käyttää hyväksi omassa tutkimuksessa. Näiden lisäksi on hyvä huomioida mitä ongelmaa lähteessä on tutkittu ja miten, sekä mitkä ovat tutkimuksen tulokset ja johtopäätökset ja mitä teorioita tai malleja tutkija on käyttänyt. Tarkoituksena on saada selkeä kokonaiskuva oman tutkimusongelman aiheesta. (Scribbr, n.d.)

Opinnäytetyö toteutetaan kuvailevana kirjallisuustutkimuksena. Siinä kuvataan mahdollisimman laajasti puukerrostalon ulkoseinä- ja alapohjarakenteiden kosteusteknistä toimintaa muuttuvassa ilmastossa. Lisäksi pyritään aineiston pohjalta löytämään ratkaisuja alussa kerrottuihin tutkimuskysymyksiin. Hakusanoina käytettiin muun muassa ilmastonmuutos, puurakentaminen ja puukerrostalo erilaisina yhdistelminä ja yksinään. Mahdollista lähdeaineistoa on löydettävissä todella paljon. Näistä valitaan tutkimusongelmaan parhaiten

sopiva aineisto, joka on tieteellisesti tuotettua ja luotettavista lähteistä kerättyä. Tämän avulla voidaan varmistua tutkimuksen luotettavuudesta. Lopulta valittuun aineistoon tutustutaan huolellisesti ja etsitään sen pohjalta vastaukset tutkimuskysymyksiin. Opinnäytetyön kirjoitusprosessi etenee koko ajan kirjallisuustutkimuksen vaiheiden edetessä ja täydentyy lähdeaineistosta saatavilla uusilla tiedoilla. Opinnäytetyössä huomioidaan eettisyys tekemällä lähdeviitaukset oikein. Tällöin lähdeaineistoon voidaan palata myöhemmin ja alkuperäisen tutkimuksen, raportin tai artikkelin kirjoittajat saavat tekemästään työstä kunnian.

4 PUUKERROSTALOT SUOMESSA

Puukerrostalo on vähintään kaksikerroksinen kerrostalo, jonka kantavat runkorakenteet on tehty pääosin puusta (Tolppanen, ym., 2013, s. 10; Puuinfo, 2020a). Tässä opinnäytetyössä keskitytään kuitenkin vähintään kolmekerroksisiin puukerrostaloihin. Vuodesta 1995 vuoden 2022 syyskuuhun mennessä yli kaksikerroksisia puukerrostaloja oli rakennettu 132 kappaletta. Määrät ovat edelleen pieniä verrattuna betonikerrostalorakentamiseen. (Karjalainen, 2022) Ympäristöministeriö on keväällä 2022 teettänyt selvityksen, jonka mukaan puukerrostalojen rakentaminen on kuitenkin loivasti kasvamassa (Ympäristöministeriö, 2022). Pääosa puukerrostaloista on 3-4 -kerroksisia. Tähän vaikuttaa osaltaan vähitellen muuttuneet palomääräykset. Vuonna 1997 sallittiin enintään neljäkerroksiset puukerrostalot ja vuonna 2011 muuttuneissa palomääräyksissä sallittiin rakentaa enintään 8-kerroksinen puukerrostalo taulukkomitoituksen avulla. Tämän jälkeen palomääräykset ovat muuttuneet vielä kerran vuonna 2018. Tässä ei tullut enää muutosta sallittuun kerrosten lukumäärään. (Karjalainen, 2019, s. 60.)

4.1 Paloturvallisuus

Puukerrostalon suunnitteluun liittyvät palomääräykset käsitellään tässä lyhyesti ja painottaen palomääräyksiä vaikuttavista vaipparakenteiden materiaali- ja valintoihin. Lisätietoa puurakenteiden paloturvallisuudesta ja siihen liittyvistä määräyksistä löytyy esimerkiksi Puuinfon kustantamasta *Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimitilarakentaminen (2021)* kirjasta. Maankäyttö- ja rakennuslaki (1999/132, 17 luku § 117b) määrittää, että rakennuksen pitää olla suunniteltu ja rakennettu käyttötarkoituksen mukaisesti paloturvalliseksi. Rakennuksen on kestävä sortumatta käyttötarkoituksen mukaan määritellyn ajan ja rakennuksesta on pystyttävä pelastautumaan itse tai avustettuna. Yksityiskohdaisemmat palomääräykset löytyvät Ympäristöministeriön antamasta rakennusten paloturvallisuus asetuksesta 848/2017. Lisäksi nykyisin on voimassa Ympäristöministeriön asetus 927/2020, jolla muutetaan voimassa olevaa paloturvallisuusasetusta joiltain osin.

Ympäristöministeriön asetuksessa rakennuksen paloturvallisuudesta (848/2017, 1 luku § 4) määritetään rakennuksille neljä paloluokkaa, joita ovat P1, P2, P3 ja P0. Näistä kolme ensimmäistä eli P1, P2 ja P3 ovat käytössä, kun rakennuksen palomitoituksessa käytetään paloturvallisuusasetuksessa annettuja taulukkoarvoja. Paloluokkaa P0 käytetään silloin, kun rakennus suunnitellaan vähintään joiltain osin oletettuun palonkehitykseen perustuvan menettelyn avulla. Paloluokkiin jako perustuu muun muassa rakennuksen käyttötarkoitukseen, palokuormaan, kerrosalaan ja kerrosten lukumäärään eli korkeuteen. (Insinööritoimisto Lahtela Oy, 2021, s. 9; Puuinfo, 2022) Tavalliset 3-8 -kerroksiset puukerrostalot kuuluvat paloluokkaan P2. Tällaiset kerrostalot on varustettava sprinklauslaitteistolla, palo-osastointi on toteutettava huoneistoittain ja rungon on säilyttävä kantavana vähintään 60 minuuttia. (Insinööritoimisto Lahtela Oy, 2021, s. 21.) Yli kaksikerroksisen puukerrostalon puurakenteet täytyy yleensä suojaverhota. Suojaverhouksella suojataan rakennusosan pinta niin, että se suojaa alustaansa tietyn ajan kaikenlaisilta palon aiheuttamilta vaurioilta. Suomessa on käytössä kaksi suojaverhouksluokkaa K₂10, jonka suojausaika on 10 minuuttia ja K₂30, jonka suojausaika on 30 minuuttia. (Puuinfo, 2022) P2-luokan puukerrostalossa sisäpuolisen

suojaverhouksen täytyy olla K₂30 -luokkaa ja lisäksi materiaalin on täytettävä A2-s1, d0 -luokan vaatimukset. Suojaverhoamatonta seinää ja kattopintaa saa olla näkyvässä tietyin edellytyksin. Julkisivun pintaluokka täytyy olla D-s2, d2 (Insinööritoimisto Lahtela Oy, 2021, s. 50). Käytännössä tämä mahdollistaa puiset julkisivut, jolloin julkisivuverhoilun takana on tuuletusrako. Tuuletusraon sisäpinnassa eli ulkoseinän rungon ulkopinnassa suojaverhouksen on oltava K₂15 ja A2-s1, d0 -luokissa. Nämä tiedot ovat kootusti taulukossa 1. (Insinööritoimisto Lahtela Oy, 2021, s. 38.)

Taulukko 1. Suojaverhous vaatimukset P2-luokan kerrostalossa (Insinööritoimisto Lahtela Oy, 2021, s. 38)

Rakennusosa	Suojaverhous	Palo-osastossa saa olla suojaverhoamatonta seinä- ja kattopintaa (ks. kuva 22)
Seinäpinnat	K ₂ 30, A2-s1, d0	<ul style="list-style-type: none"> • ei-kantavat väliseinät • ≤ 20 %, ilman erityisvaatimuksia • > 20 % ... ≤ 80 %, jos rakennusosat R 90 ja EI 90 • > 80 %, jos rakennusosat R 120 ja EI 120
Kattopinnat	K ₂ 30, A2-s1, d0	
Lattiapinnat	K ₂ 30, A2-s1, d0	
Ulkoseinän rungon ulkopinnat (tuuletusraon sisäpinta)	K ₂ 10, A2-s1, d0	

Suojaverhouksen lisäksi palomääräyksissä esitetään vaatimuksia muillekin rakenteissa käytettäville rakennustarvikkeille. Puukerrostalossa lämmöneristeiden on oltava A2-s1, d0 -luokkaa ja kantavien rakenteiden vähintään D-s2, d2 -luokkaa. (Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta 848/2017, 2 luku § 12.) Taulukossa 2 on kerrottu tarkemmin rakennustarvikkeiden luokkamerkinnän muodostumisesta ja merkityksestä.

Taulukko 2. Rakennustarvikkeiden luokkamerkinnän muodostuminen (Insinööritoimisto Lahtela Oy, 2021, s. 23).

Osallistuminen paloon		Savun tuotto		Palavien pisaroiden ja osien tuotto	
Kuvaus	Merkintä	Kuvaus	Merkintä	Kuvaus	Merkintä
Ei osallistu paloon	A1	Erittäin vähäinen	s1	Ei esiinny	d0
Osallistuu erittäin rajoitetusti	A2	Vähäinen	s2	Nopeasti sammuvia esiintyy	d1
Osallistuu hyvin rajoitetusti	B	Muu kuin s1 tai s2	s3	Muu kuin d0 tai d1	d2
Osallistuu rajoitetusti	C				
Osallistuminen hyväksyttävää	D				
Käyttäytyminen hyväksyttävää	E				
Käyttäytymistä ei ole määritetty	F				

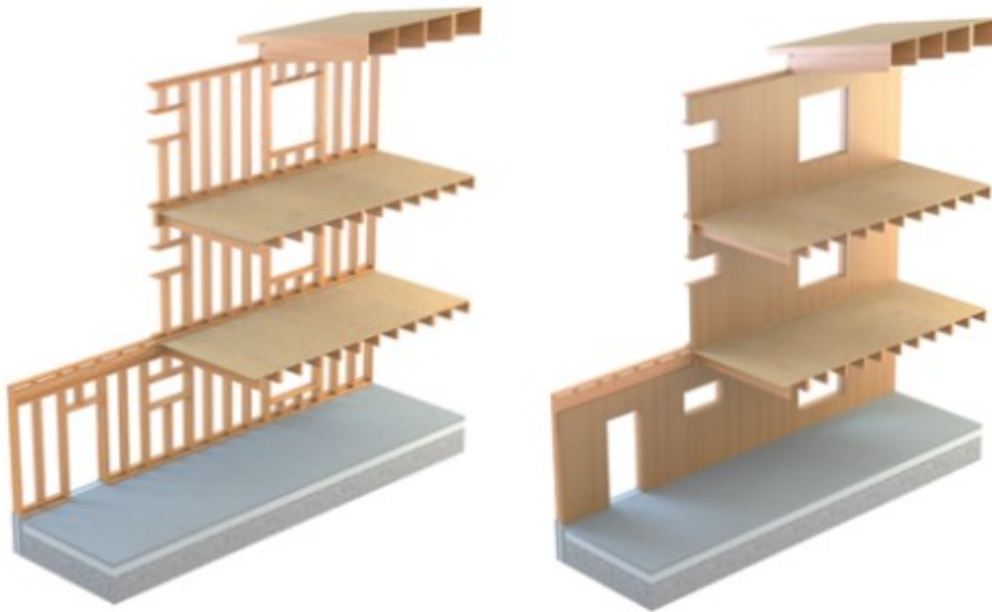
Käytännössä suojaamattoman puun tarvikeluokka on D ja palosuojattu puu kuuluu luokkaan B (Puuinfo, 2022). Tarvikeluokkamerkinnän ensimmäinen osa kertoo osallistuuko rakennustarvike paloon, toinen osa kuinka paljon se

tuottaa savua. Viimeinen merkintä kertoo paljonko rakennustarvike tuottaa palavia osia ja pisaroita (Insinööritoimisto Lahtela Oy, 2021, s. 23).

4.2 Runkorakennejärjestelmät

Rakennejärjestelmä on kokonaisuus, joka muodostuu rakennuksen runkojärjestelmästä eli kantavien ja jäykistävien rakenneosien muodostamasta kokonaisuudesta, ja muun muassa ei-kantavista ulkoseinistä ja osastoivista väliseinistä. Puukerrostalon rakennejärjestelmän tekoon on useampia vaihtoehtoja. (Tolppanen, ym., 2013, s. 30) Kaikille järjestelmille on yhteistä, että rakenneosat ovat teollisesti esivalmistettuja, minkä vuoksi rakentaminen varsinaisella rakennuspaikalla on nopeaa ja rakennus saadaan suojattua säältä nopeasti (Puuinfo, 2020b). Rakennejärjestelmän valinta sitoo tilaajan tiettyyn toimittajaan ja vähentää näin kilpailuttamismahdollisuuksia. Siksi valintaa ei kannata tehdä liian aikaisessa vaiheessa. Tämä on mahdollista puurakentamiseen kehitettyjen yleisten suunnitteluperiaatteiden eli RunkoPES:n ansiosta. RunkoPES:n mukaisesti suunniteltuna rakennejärjestelmät ovat keskenään yhteensopivia ja tarvittaessa eri valmistajien tuotteita voidaan liittää toisiinsa. (Tolppanen, ym., 2013, s. 34) Nykyisin käytössä on 12-osainen RunkoPES 2.0, joka on löydettävissä Puuinfon verkkosivuilta (Puuinfo, 2020c).

Nykyisin yleisin puukerrostalon runkojärjestelmä perustuu kantaviin seiniin, joille johdetaan vaakarakenteiden kuormat. Jäykistäviä rakenteita ovat lattiat ja osa seinistä. Tämä runkojärjestelmä voidaan toteuttaa rankarakenteisena, jolloin kerrostaloissa käytettävät suurelementit ovat kerroksen korkuisia ja koko seinän mittaisia. Runko on tällöin tehty liima- tai kertopuusta. Kantavien seinien runkojärjestelmä voidaan toteuttaa myös CLT-massiivipuulevyistä tehdyillä suurelementeillä. Kuvassa 2 vasemmanpuolinen kuva on rankarakenteisestä runkojärjestelmästä ja oikeanpuolinen CLT-suurelementeillä toteutetusta runkojärjestelmästä. Kuvassa näkyvät välipohjarakenteet ovat ripalaattarakennetta, joka on Suomessa yleinen tapa toteuttaa puukerrostalojen välipohjia. (Tolppanen, ym., 2013, s. 39-40, 43; Puuinfo, 2020d)



Kuva 2. Havainnekuvat rankarakenteisesta ja CLT-suurelementeillä toteutetusta kantavasta seinät-runkojärjestelmästä. (Puuinfo, 2020d)

Pilari-palkkijärjestelmä on toinen Suomessa paljon käytetty tapa tehdä puukerrostalon runkorakenne. Tämä järjestelmä perustuu liima- tai kertopuusta tehtyihin pilareihin ja palkkeihin, joiden kautta tasorakenteiden sekä ulkoseinien kuormat siirtyvät pilareille. Ulkoseinät ovat tyypillisesti rankarakenteisia suurelementtejä. Tyypillinen pilari-palkkijärjestelmällä toteutettu runko on nähtävissä kuvassa 3 olevasta havainnekuvasta. Koska ulko- ja väliseinät eivät ole kantavia, valmis rakennus on muuntojoustavampi kuin kantavien seinien järjestelmällä tehty kerrostalo. Lisäksi julkisivuihin saadaan helposti tehtyä suuriakin aukkoja. Pilari-palkkijärjestelmän jäykistys tehdään tavallisesti mastopilareilla ja vinositeillä, mutta tarvittaessa voidaan käyttää levyjäykistystä. Yksimittaisten pystyrakenteiden takia pilari-palkkijärjestelmä ei painu. Lisäksi järjestelmän etuihin kuuluu nopea runkovaihe, jonka takia vesikatto saadaan muutamassa päivässä paikalleen ja rakentamista voidaan jatkaa säältä suojassa. (Tolppanen, ym., 2013, s. 46-47; Puuinfo, 2020d.)



Kuva 3. Havainnekuva pilari-palkkijärjestelmällä toteutetusta kerrostalon rungosta. (Puuinfo, 2020d.)

Puukerrostalon runkojärjestelmänä voidaan käyttää myös tilaelementtejä ja yhdistelmärakenteita, joissa rungossa käytetään puu lisäksi esimerkiksi betonia tai kipsiä. Tilaelementit ovat rakennuksen valmiita lohkoja, jotka on valmistettu tehtaalla. Niissä on valmiina vähintään seinät, katto ja lattia, mutta siihen voidaan lisätä valmiiksi myös esimerkiksi LVI-tekniikka. Tilaelementtejä voidaan käyttää myös sellaisissa rakennuksissa, joissa varsinainen runkojärjestelmä on toteutettu jollain muulla tavalla. Tällöin tilaelementit ovat tyypillisesti WC-, kylpyhuone- tai saunaelementtejä. Suomessa tilaelementtien käyttö on vähäistä, mutta Ruotsissa niiden käyttö puukerrostalojen rakentamisessa on hyvin yleistä. (Tolppanen, ym., 2013, s. 48-49; Puuinfo, 2020d.)

4.3 Insinööripuutuotteet

Puu on materiaalina lujaa ja helposti työstettävää. Nämä ominaisuudet säilyvät teollisesti valmistetuissa insinööripuutuotteissa. Suomessa käytettäviä insinööripuutuotteita ovat CLT-massiivilevyt, LVL eli viilupuu ja liimapuu. Yhteistä näillä kaikille on, että ne on valmistettu liimaamalla. Euroopassa on käytössä mekaanisilla liittimillä yhteen kootut NLT-, MHM- ja DLT-massiivipuulevyt, joita ei käsitellä tarkemmin tässä opinnäytetyössä. (Puuinfo, 2020e) Teollisesti

valmistetut rakennusosat pystytään valmistamaan mittatarkasti. Lisäksi puun etuna on keveys, mikä helpottaa erityisesti suurien elementtien siirtelyä. (Tolppanen, ym., 2013, s. 31)

4.3.1 CLT-massiivipuulevy

Lyhenne CLT tulee sanoista Cross Laminated Timber. Se on tehty ristiin liima-
tuista lautakerroksista. Näitä kerroksi on yleensä kolme tai viisi, mutta myös
paksumpia eli useampi kerroksisia massiivipuulevyjä tehdään. Levyn paksuus
vaihtelee 60–400 millimetrin välillä. Levyn enimmäispituus ja -leveys vaihtelevat
valmistajakohtaisesti, jolloin maksimipituus on 12–20 metriä ja -leveys
2,95–4,8 metriä. (Puuinfo, 2023) Kuvassa 4 on pystyssä kolmekerroksinen
CLT-levy ja lappeellaan viisikerroksinen levy.



Kuva 4. CLT-levy (Puuinfo, 2023)

CLT-levy liimataan kokoon joko vakuumiliimauksella, jolloin laudat puristetaan kiinni toisiinsa tyhjiön avulla, tai puristamalla laudat yhteen prässien avulla. Levyt voidaan valmistaa syrjäliimaamalla, jolloin lautakerrokset liimataan ensin yhtenäisiksi syrjiltään. Tämän jälkeen liimataan päällekkäiset tasot. Toinen vaihtoehto on latoa laudat ristiin ja liimata ne vain lappeelta, jolloin syrjien liimaus jää kokonaan pois. Liimaustapa vaikuttaa tuotteen ominaisuuksiin erityisesti kosteuselämisessä, koska se tapahtuu levyjen saumoissa, eikä se ole

mahdollista syrjäliimatassa levyssä. Kun levyt on valmiiksi liimattu, niitä voidaan työstää erittäin mittatarkasti oikean muotoisiksi CNC-jyrsimen avulla. (Puuinfo, 2023)

CLT-levyt kestävät hyvin paloa ja ristikkäisen rakenteen ansiosta ne ovat erittäin lujia ja jäykkiä. Suuretkin CLT-elementit ovat kevyitä erityisesti betoniin verrattuna. (Puuinfo, 2023) Massiivipuurakenteesta huolimatta seinissä ei tapahdu painumista (Laamanen, ym., 2022, s. 94). Näiden ominaisuuksien vuoksi niiden suosio runkorakenteena on kasvamassa Suomessa. CLT on tuotteena verrattain kallis, mutta kerrostalon korkeuden eli kerrosmäärien kasvassa CLT-rakenteen kilpailukyky paranee. CLT-levyt CE-merkitään eurooppalaisen teknisen hyväksynnän mukaan, koska niille ei ole vielä olemassa eurooppalaista tuotestandardia. Käytännössä CLT-tuotteiden tekniset ominaisuudet ovat valmistajakohtaisia. Suomessa CLT-levyjä valmistavat CrossLam Kuhmo Oy, CLT Finland Oy ja CLT Plant Oy. (Puuinfo, 2023) Lisäksi Stora Enso tuo Suomeen Itävallassa valmistettuja levyjä (Puuinfo, 2020f). Näin ollen suunnittelussa on käytettävä aina valmistajan antamia tietoja.

4.3.2 LVL eli viilupuu

LVL eli viilupuu valmistetaan liimaamalla noin 3 millimetriä paksuja viiluja toisiinsa. Näistä valmistetaan 27–75 millimetrin paksuinen palkki, jonka maksimi-levyys on 2,5 metriä ja -pituus 24–25 metriä. Suomessa viilujen valmistukseen käytetään kuusta. Viilupuun rakenne voi valmistustavasta riippuen olla kahdenlaista: kaikkien viilujen syysuunta voi olla pituussuuntaan tai osa viiluista voi olla kerroksittain asetettu ristikkäin syysuuntaa vasten. Kuvassa 5 on näkyvissä LVL-tuotteiden rakennetta. Valmistustavasta riippuu, käytetäänkö valmista viilupuuta pysty- vai vaakarakenteena. (Puuinfo, 2020h; Siikainen, 2008, s. 106.)



Kuva 5. LVL eli viilupuu (Puuinfo, 2020h).

Viilupuuta valmistavat Suomessa Stora Enso ja Metsä Wood. Tunnetuin viilupuutyyppi on Metsä Woodin valmistama Kertopuu. (Puuinfo, 2020h) Kertopuusta on kolme eri tuotetta, jotka ovat: Kerto-S, Kerto-T ja Kerto-Q. Näiden tuotteiden rakenne on erilainen ja niitä käytetään eri tarkoituksiin. (Siikainen, 2008, s. 106.)

4.3.3 Liimapuu

Liimapuu tehdään liimaamalla yhteen lamelleja, joiden syysuunta on valmiin liimapuutuotteen pituussuuntainen. Kuvassa 6 näkyy liimapuun lamelleista koostuva rakenne. Valmiissa liimapuussa on vähintään kaksi lamellia ja yhden lamellin paksuun on enintään 45 millimetriä. (Puuinfo, 2020i)



Kuva 6. Liimapuuta (Puuinfo, 2020i).

Liimapuusta voidaan tehdä hyvin suuria kattopalkkeja tai siltarakenteita. Suuret liimapuutuotteet tehdään asiakkaan toiveiden mukaisina tilaustuotteina. Tavallisesti liimapuutuotteen poikkileikkaus on suorakaide, mutta myös muun mallisia poikkileikkauksia voidaan valmistaa. (Riipola, K., ym., 2014, s. 27.)

5 RAKENNUSFYSIKKA

Tässä kappaleessa kerrotaan rakenteiden rakennusfysikaalisesta toiminnasta keskittyen kosteustekniseen toimintaan. Rakenteiden lämpötekniinen toiminta käydään läpi oleellisilta osin. Alapohjan ja ulkoseinien, kuten muidenkin vaipparakenteiden, lämpöteknisellä toimivuudella on tärkeä merkitys rakennuksen energiankulutuksen vähentämisessä. Ympäristöministeriön asetuksessa uuden rakennuksen energiatehokkuudesta vaaditaan määrittämään uudisrakennuksen kokonaislämpöhäviön määrä. Kokonaislämpöhäviö koostuu rakennuksen vaipan, ilmanvaihdon ja vuotoilman kautta tapahtuvista lämpöhäviöistä. Rakennuksen vaipan lämpöhäviö lasketaan jokaisen vaipan osan lämmönläpäisykertoimien eli U-arvojen pohjalta. Vaipan eri osille on määriteltä lämmönläpäisykertoimen eli U-arvon vertailuarvot, jotka ovat samalla vaaditut minimiraja-arvot. Lämpimille ja puolilämpimille tiloille raja-arvot ovat:

- ulkoseinät $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- ryömintätilainen alapohja $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- maanvarainen alapohja $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- yläpohja $0,09 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- ikkunat, ovet ja muut aukot $1,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. (2017/1010, 3 luku § 23-24.)

Lämmönläpäisykerroin tarkoittaa rakennuksen vaipan läpäisevää lämpöilmavirtaa neliön kokoisella alueella, kun lämpötilaero rakennuksen sisä- ja ulkopuolen välillä on yhden lämpötilayksikön suuruinen. U-arvo on kokonaislämmönvastuksen käänteisluku. (Siikainen, 2014, s. 50.)

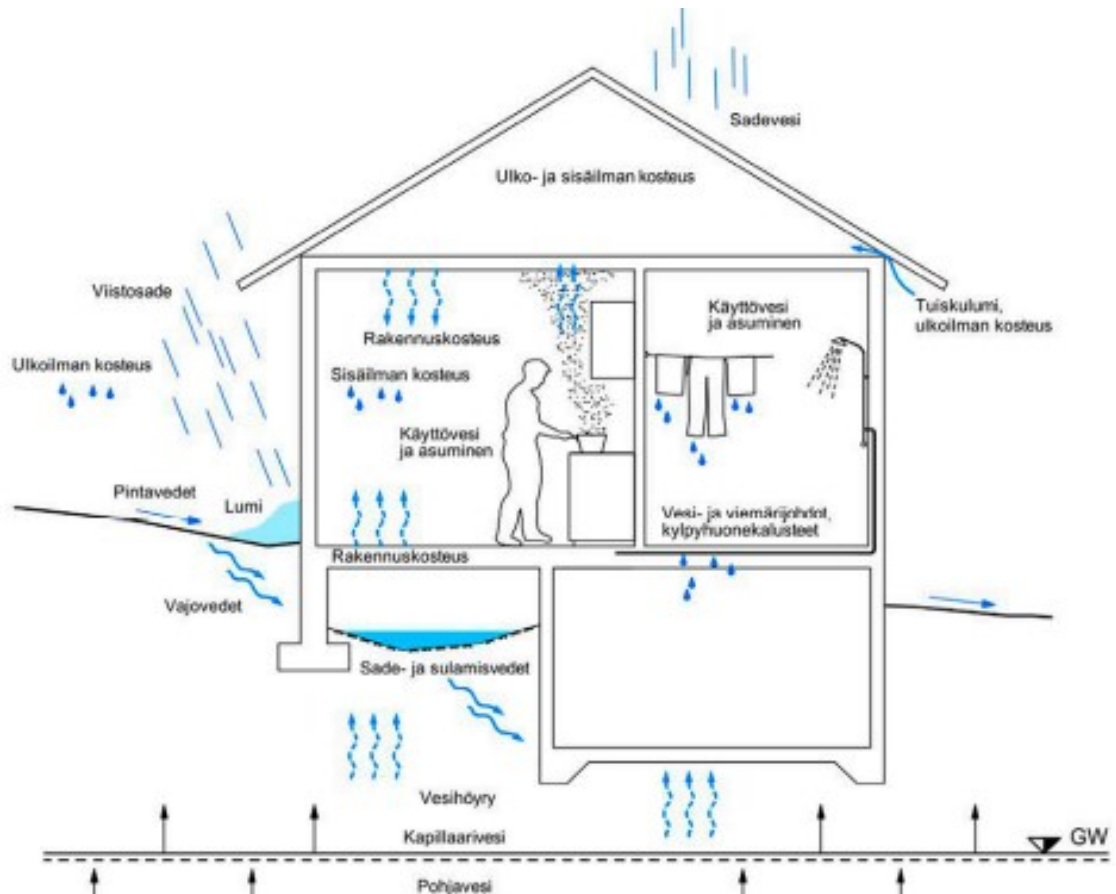
Lämmönvastus lasketaan erikseen jokaiselle rakenteen rakennekerrokselle ja se kertoo mikä on kerroksen ulko- ja sisäpinnan lämpötilaeron ja läpikulkevan lämpövirran tiheyden suhde. Rakenteen kokonaislämmönvastus saadaan laskemalla yhteen jokaisen rakennekerroksen lämmönvastukset ja lisäämällä saatuun tulokseen vielä sisä- ja ulkopuoliset pintavastukset. (Siikainen, 2014, s. 46.) Rakennekerroksen lämmönvastuksen laskemista varten tarvitaan tieto siitä, kuinka suuri lämmönjohtavuus on sillä materiaalilla, mistä rakennekerros on tehty. Lämmönjohtavuus tarkoittaa materiaalin läpi kulkevan lämpövirran tiheyttä. Käytännössä laskennassa käytetään materiaalivalmistajan antamaa lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoa. Mikäli materiaalivalmistajan antamaa tietoa ei ole saatavilla, voidaan käyttää erilaisten materiaalien keskimääräisiä taulukkoarvoja. (Siikainen, 2014, s. 41)

Rakenteen kosteusteknisen toiminnan laskennalliseen arviomiseen tarvitaan rakenteen sisälämpötilojen lisäksi tieto siitä, mikä on kunkin materiaalin vesihöyrynvastusarvo. Vesihöyrynvastus kertoo kuinka paljon aineella on vesihöyryn virtausta estävää ominaisuutta. Sen yksikkö on $(\text{m}^2\text{sPA})/\text{kg}$. Materiaalien ominaisuuksia voidaan mitata myös vesihöyrynläpäisevyydellä, joka on vesihöyrynvastuksen käänteinen arvo. Vesihöyrynläpäisevyys kertoo kuinka paljon materiaali päästää lävitseen vesihöyryä. Yksikkö on $\text{kg}/(\text{msPa})$. Tämän tiedon pohjalta voidaan laskea kuinka paljon eri rakennekerroksissa on kosteutta. (Siikainen, 2014, ss. 72-73.) Rakenteen sisäisen lämpötilan ja kosteuden merkityksestä on kerrottu lisää höyryn- ja ilmansulkukappaleessa. U-arvon laskemista varten on tarjolla useampia valmiita laskentaohjelmia. Puuinfo ylläpitää puurakenteiden U-arvon määrittämiseen tarkoitettuja Excel-laskentapohjia. Nämä laskentapohjat on löydettävissä Puuinfon Internet-sivulta. (Puuinfo, 2021) Lisäksi D.O.F. Tech Oy tarjoaa ohjelmaa, jonka avulla voidaan U-arvon lisäksi laskea rakenteen hetkelliset lämpötila- ja kosteusjakaumat. Niiden avulla voidaan tarkastella rakenteen hetkellistä kosteusteknistä toimintaa. Ohjelma laskee eri rakennekerroksien kosteusmäärät ja kyllästymiskosteudet. (D.O.F tech Oy, 2003, s. 3.) Kyllästymiskosteus riippuu rakenteen lämpötilasta, ja kertoo paljonko vesihöyryä voi olla sitoutunut tietyn lämpöiseen ilmaan ennen kuin se tiivistyy vedeksi (Siikainen, 2014, s. 70). Mikäli rakenteessa oleva kosteusmäärä ylittää

kyllästymiskosteuspitoisuuden, materiaalikerroksessa oleva kosteus tiivistyy sen pintaan nestemäiseksi vedeksi (D.O.F tech Oy, 2003, s. 27). DOF-lämpö-ohjelmasta on saatavilla pilviversio, jossa on tallentamista lukuunottamatta samat ominaisuudet kuin lisenssiversiossa (ISOVER, 2023).

5.1 Kosteuslähteet ja kosteuden siirtyminen

Rakenteisiin kohdistuu monia kosteusrasituksia, jotka on havainnollistettu kuvassa 7. Kosteustekniset rasitukset voidaan jakaa sisä- ja ulkopuolisiin rasituksiin (Pitkäranta, 2016, s. 106). Näiden lisäksi on rakennekosteutta, joka on rakennusmateriaaleihin varastoinnin ja rakentamisvaiheen aikana sitoutunutta ylimääräistä kosteutta. Se on erityisesti uusien rakennuksien ongelma. Rakennekosteus on huomioitava erityisesti puurakenteisissa taloissa, koska puu huokoisena materiaalina kerää helposti kosteutta itseensä. Lisäksi puun kuivuminen rakenteessa aiheuttaa turhaa elämistä ja heikentää rakennetta. Rakennekosteuden syntymistä onkin vähennettävä pitämällä rakennusmateriaalit sateelta suojattuina kuljetuksen, varastoinnin ja rakentamisen aikana. (Siikainen, 2008, s. 148.) Lisätietoja rakennuksen koko elinkaaren aikaiseen kosteudenhallintaan löytyy Rakentamisen Laatu RALA ry:n ylläpitämästä Kuivaketju10 -toimintamallista. Malli tarjoaa konkreettisia ohjeita ja riskilistoja kosteusriskin hallintaan ja torjuntaan koko rakennushankkeen ajan. Nämä löytyvät Kuivaketju10:n Internet -sivuilta. (Rakentamisen Laatu RALA ry, n.d.)

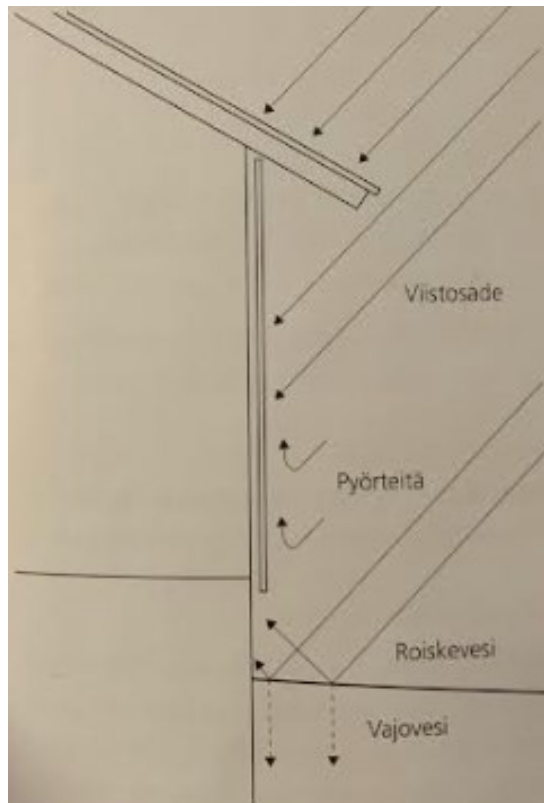


Kuva 7. Rakennuksen kosteuslähteet (Pitkäranta, 2016, s. 107).

Rakennuksen sisäpuolinen kosteus syntyy pääasiassa asumiseen liittyvistä toiminnoista, kuten peseytymisestä ja pyykkien kuivauksesta, mutta jossain määrin myös rakenteista haihtuvasta rakennekosteudesta. Ilmassa olevan kosteuden määrää voidaan ilmaista absoluuttisena tai suhteellisena kosteutenä. Absoluuttisella kosteudella ilmaistaan, kuinka paljon ilmassa on kosteutta grammoina kohti ilmakeuutiometriä eli kg/m^3 . Käytännössä lämmin ilma voi sisältää enemmän vesihöyryä kuin kylmä. Suhteellinen kosteus puolestaan kertoo prosentteina, kuinka paljon vettä tietyn lämpöinen ilma sisältää, siitä maksimi veden määrästä, jonka tietyn lämpöinen ilma voi sisältää. Ilman suhteellinen kosteus ei voi nousta yli 100 prosentin, koska sen jälkeen kosteus tiivistyy nestemäiseksi vedeksi. (Siikainen, 2014, ss. 68-69.) Sisäilmassa on aina enemmän kosteutta kuin ulkoilmassa. Talvisin sisäilman kosteuslisä on suurempi kuin kesäisin. Kesällä rakennukset yleensä tuulettuvat paremmin, kun ikkunoita ja ovia pidetään auki. Tämä pienentää sisä- ja ulkoilman kosteuseroa. Rakennesuunnittelua varten sisäilman kosteuslisälle on määritelty mitoitusarvot. Kerrostaloissa mitoitusarvo on talvisin 5 g/m^3 . Kesäisin

mitoitusarvo on pienempi, mutta käytännössä rakenteet tulee suunnitella toimimaan hankalampien olosuhteiden mukaisesti. (Laamanen, ym., 2022, s. 22.) Talvisin myös ulko- ja sisäilman lämpötilaero on suurempi, jolloin rakenteen sisällä tapahtuvan kosteuden kondensoitumisen riski on suurempi. Ilmassa olevan kosteuden tiivistymistä pinnoille kutsutaan kondensoitumiseksi. Kondensoitumista tapahtuu ilmaa kylmemmille kiinteille pinnoille, kun ilman lämpötila niiden läheisyydessä laskee kastepisteeseen eli ilma on saavuttanut kyllästyskosteuden ja suhteellinen kosteus on 100 prosenttia. Kondensoitumista voi tapahtua myös rakenteen sisällä, kun ilman lämpötila laskee rakenteessa ulospäin siirryttäessä. (Siikainen, 2014, s. 72.) Kosteus siirtyy rakenteiden sisällä diffuusion avulla (Laamanen, ym., 2022, s. 21). Diffuusiosta kaasut pyrkivät sekoittumaan toisiinsa tasaiseksi kaasuseokseksi. Rakenteissa tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että enemmän vesihöyryä sisältävä ilma pyrkii tasoitumaan rakenteen läpi vähemmän vesihöyryä sisältävään ilmaan. (Siikainen, 2014, s. 71.)

Rakennuksen ulkopuolelta tulevia kosteuden lähteitä ovat sadevesi ja maaperässä oleva huokoskosteus, sekä pohjavesi. Huokoskosteuden vuoksi maan suhteellisen kosteuden arvona pidetään RH 100 prosenttia. Maassa oleva kosteus nousee maanvastaisiin rakenteisiin kapillaarisesti tai haihtumalla tuuletuttuun alapohjaan. Kapillaarivirtauksessa vesi siirtyy huokoisessa aineessa ylöspäin huokosalipaineen vaikutuksesta. Sateisina aikoina osa maahan päätyneestä sadevedestä imeytyy maahan vajovedeksi. Imeytymättä jäänyt vesi on pintavettä, joka täytyy johdattaa valumaan rakennuksesta pois päin. (Siikainen, 2014, ss. 66-68; Vinha, ym., 2014, s. 151.) Kuvassa 8 on esitetty viistosateen osuminen rakenteisiin.



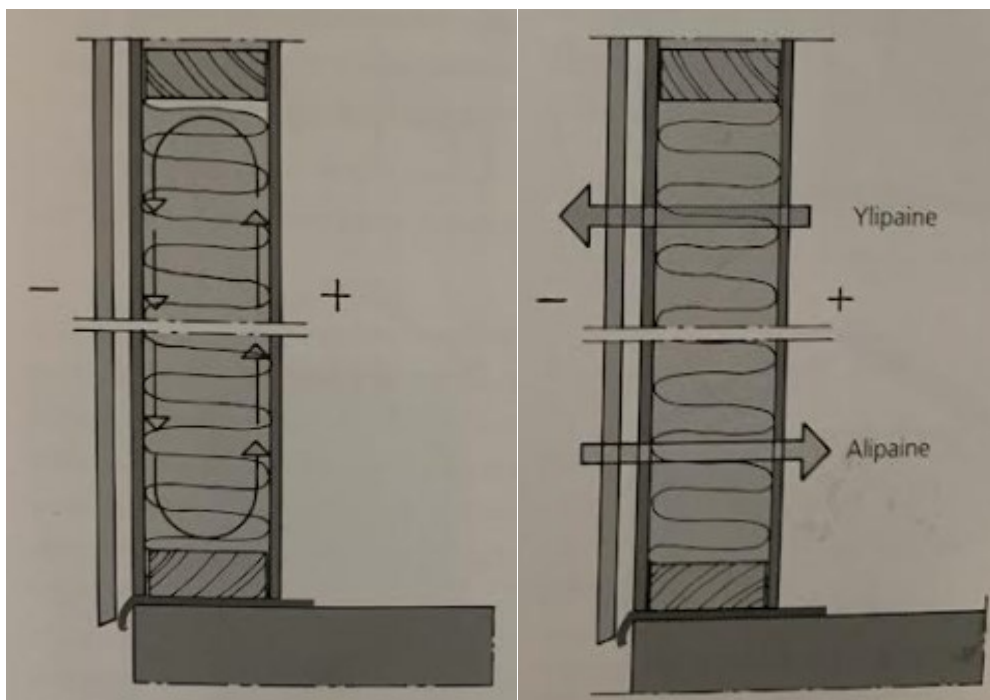
Kuva 8. Viistosateen osuminen rakennukseen (Siikainen, 2014, s. 67).

Sade, joka voi olla vettä, räntää tai lunta, aiheuttaa merkittävän kosteusrasituksen rakennuksen vesikatolle ja seinien ulkoverhoilulle. Lisäksi tuulisuus aiheuttaa pyörteitä, jotka saavat veden nousemaan ylöspäin rakenteessa. Seinän alaosaa ja sokkeliä rasittaa myös maahan sataneesta vedestä rakennetta päin roiskuva vesi. (Siikainen, 2014, ss. 66-68.)

5.2 Rakennuksen paine-erot

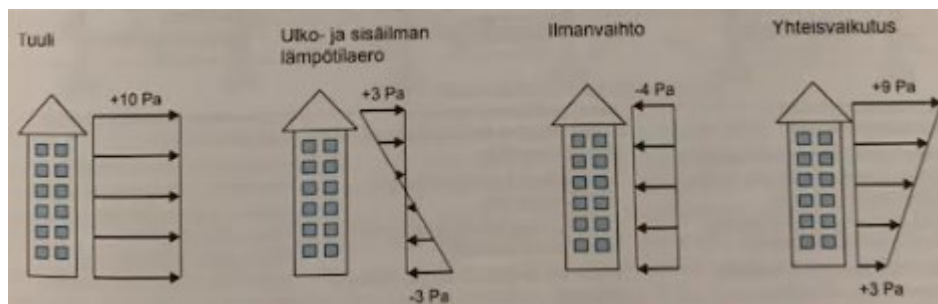
Diffuusion lisäksi kosteutta siirtyy rakenteisiin ilman mukana myös ilmanpaine-erojen vaikutuksesta. Kosteuden siirtymisen lisäksi ilmanpaine-erot voivat kuljettaa rakenteesta tai maaperästä epäpuhtauksia huoneilmaan ja aiheuttaa vedon tunnetta. Ilmanpaine-eroja esiintyy sekä rakenteiden sisällä, että rakennuksen sisällä. Ilmanpaineen vaihtelut aiheuttavat ilman virtausta eli konvektiota. Konvektio voi syntymistavasta riippuen olla luonnollista tai pakotettua. Luonnollista konvektiota esiintyy ilmaraoissa ja yli 125 millimetriä paksuissa pehmeissä eristekerroksissa, jotka ovat riittävän korkeita. Luonnollinen konvektio syntyy rakenteen sisäisestä lämpötilaerosta. Ilma lämpenee ja sen

tiheys pienenee eristekerroksen sisäpinnan lähellä. Lämmin ilma muuttuu keveämmäksi kuin kylmä ja pyrkii kohoamaan ylöspäin. Eristekerroksen ulkoreunalla on viileämpää ja ilma lähtee alaspäin. Näin syntyy pyörivä liike, joka on havainnollistettu kuvassa 9 vasemmalla puolella. Erityisesti pehmeä mineraalivillaeriste on herkkä luonnolliselle konvektiolle. Kovissa mineraalivillaeristeissä luonnollista konvektiota ei juuri esiinny. Eristeen sisäinen konvektio heikentää lämmöneristystä kuitenkin vain vähän. Suurempi ongelma aiheutuu ilmassa olevasta kosteudesta, joka kulkee myös konvektion mukana ja saattaa tiivistyä erityisesti ulkoseinän ylä- ja alaosiin. Tämä on huomioitava rakenteen suunnittelussa. Luonnollista konvektiota esiintyy myös muissa rakenteissa, kuten ikkunoissa ja huonosti tuulettuvissa tai kokonaan tuulettumattomissa ullakotiloissa. Näissä konvektion voimakkuuteen vaikuttaa muun muassa tilan korkeus ja katon jyrkkyys. Pakotettu konvektio tarkoittaa koko rakenteen läpi kulkevaa ilmavirtaa. Rakennuksen ollessa alipaineinen sinne virtaa rakenteen läpi ilmaa ulkopuolelta, kun taas ylipaineisesta rakennuksesta ilma pyrkii siirtymään rakenteen läpi ulospäin. (Siikainen, 2014, ss. 34-35) Pakotettu konvektio on havainnollistettu kuvassa 9 oikealla puolella.



Kuva 9. Luonnollinen ja pakotettu konvektio ulkoseinässä (Siikainen, 2014, s. 35).

Pakotetun konvektion aiheuttaa ilmanpaine-ero, joka on syntynyt savupiippuvaikutuksen, LVI-laitteiden, kuten esimerkiksi ilmastoinnin ja tuulen yhteisvaikutuksesta. Tämä on havainnollistettu kuvassa 10. Savupiippuvaikutuksen aiheuttaa periaatteessa sama ilmiö kuin luonnollisen konvektionkin eli lämpimän ilman nousu ylöspäin. (Siikainen, 2014, s. 35.) Ulko- ja sisäilman lämpötilaero vaikuttaa savupiippuvaikutuksen suuruuteen. Suurimmillaan savupiippuvaikutus onkin talvisin sisä- ja ulkoilman lämpötilaeron ollessa suuri (Laamanen, ym., 2022, s. 26.) Huonetilassa lämmin ilma nousee ylöspäin ja aiheuttaa näin huoneen yläosaan ylipainetta. Samaan aikaan huoneen alaosa jää alipaineiseksi. (Siikainen, 2014, s. 35.) Yhtenäisen tilan korkeus vaikuttaa myös paine-eroon. Käytännössä savupiippuvaikutuksen aiheuttamat paine-erot ovat pieniä, vaikka korkeissa tiloissa niiden vaikutus suureneekin. (Siikainen, 2014, s. 36.) Savupiippuvaikutuksen aiheuttamiin pysyviin paine-eroihin vaikuttaa rakennuksen ilmanvaihto ja tuulisuus. Nykyisin ilmanvaihto pyritään säätämään niin, että sisätiloihin syntyisi korkeintaan pieni alipaine. Tuulen vaikutus rakennuksen paine-eroihin vaihtelee tuulen voimakkuuden ja suunnan mukaan. Tuulenpuoleiselle seinälle syntyy rakennuksen sisällä alipaine ja vastakkaiselle eli suojanpuoleiselle seinälle syntyy ylipaine. (Laamanen, ym., 2022, s. 25.)



Kuva 10. Tuulen, savupiippuvaikutuksen ja ilmanvaihdon aiheuttaman paineeron yhteisvaikutus (Laamanen, ym., 2022, s. 25).

Rakennukselle ja rakenteille aiheutuu haittaa sekä ylipaineesta että alipaineesta. Ylipaineen vaikutuksesta sisäilmassa oleva kosteus pääsee tunkeutumaan vuotoilman mukana rakenteisiin. Rakenteen muuttuessa viileämmäksi ulospäin mentäessä sisäilman kosteus saattaa tiivistyä rakenteisiin. Tämä on tyypillinen yläpohjien ongelma. Alipaine aiheuttaa ilmavuotoja ulkoilmasta sisäilmaan varsinkin rakennuksen alaosissa. Näiden ilmavuotojen mukana

saattaa sisäilmaan kulkeutua maaperän mikrobeja ja muita haitallisia aiheita, kuten radonia. (Laamanen, ym., 2022, s. 26.) Vaipparakenteiden tekeminen mahdollisimman tiiviiksi vähentää ilmapuotoja ja näin ollen myös rakennuksen paine-erojen haitallisia vaikutuksia (Siikainen, 2014, s. 35). Erityistä huomiota on myös kiinnitettävä vaipparakenteiden liitoskohtien suunnitteluun ja toteutukseen. Tarkempia ohjeita vaipparakenteiden liitosten toteutukseen löytyy lähteistä (Tolppanen, ym., 2013) ja (Åström, ym., 2020)

5.3 Puun materiaaliominaisuudet

Puu koostuu pitkittäisistä soluista, joiden onteloissa on niin sanottua vapaana olevaa vettä. Lisäksi solujen seinämiin on sitoutunut vettä. Puun sisällä onkin aina jonkin verran kosteutta. Solujen seinämiin sitoutunut vesi poistuu vasta sen jälkeen, kun solujen sisällä oleva vapaa vesi on haihtunut. Puun kutistuminen johtuu veden haihtumisesta. Kuvassa 11 on kolmen kuvan sarja, joka kuvaa kosteuden poistumista puun solukosta. Vasemmalla solukossa on vapaata vettä, keskellä vapaa vesi on poistunut ja oikealla solujen seinämiin sitoutunut vesi on poistunut. Vapaan veden poistuttua solukoista männyn ja kuusen kosteuspitoisuus on vielä noin 30 prosenttia. Rakentamiseen käytettävä puu kuivataan erilaisilla menetelmillä, niin että kosteus on noin 8-25 prosenttia. Valmiissa rakenteessa puun kosteuden pitäisi pysyä alle 20 prosentissa. Tällöin home, lahottajasienet ja muut biologiset tuholaiset pysyvät poissa. (Puuinfo, 2020g; Siikainen, 2008, s. 43.)



Kuva 11. Kosteus puun solukossa (Siikainen, 2008, s. 44).

Puu on hygroskooppista ainetta. Hygroskooppisuus tarkoittaa, että puu pystyy sitomaan kosteutta ilmasta ja toisaalta myös luovuttamaan sitä. Hygroskooppinen aine pyrkii tasapainokosteuteen eli samaan kosteuspitoisuuteen kuin sen ympärillä oleva ilma tai muu materiaali. Kuivuessaan puu kutistuu ja muuttuu lujemmaksi. Kutistuminen, samoin kuin turpoaminen, on syitä kohtaan poikkittaisessa suunnassa huomattavasti suurempaa kuin syiden suuntaisesti. Tämä ominaisuus tekee puusta anisotrooppisen materiaalin. Anisotrooppisuus vaikuttaa myös puun lujuusominaisuuksiin. Puu on lujempaa, kun kuormitus kohdistuu syiden suuntaisesti. (Puuinfo, 2020g; Siikainen, 2008, ss. 45, 143.)

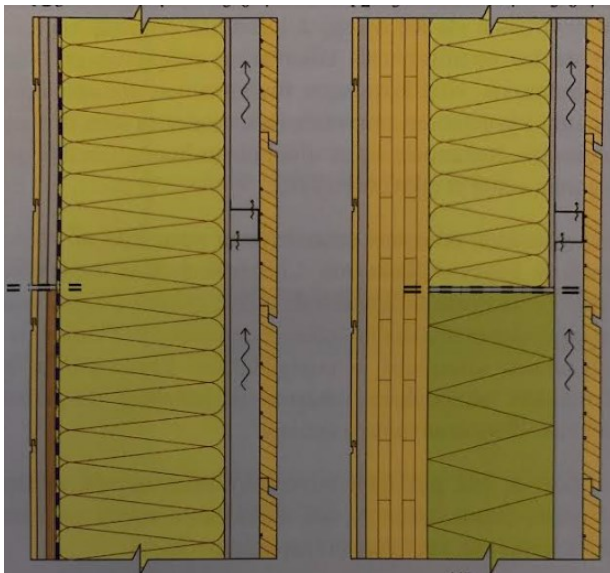
Insinööripuutuotteilla on samat ominaisuudet kuin käsittelemättömällä puulla, koska hygroskooppiset ja anisotrooppiset ominaisuudet säilyvät käsittelystä huolimatta (Puuinfo, 2020g). Viilupuun kosteuselämisen määrä riippuu viilupuun valmistustavasta eli ovatko viilujen syyt pituussuuntaisesti vai ristikkäin. Kosteuselämisen takia viilupuu voi käyristyä, mikäli viilupuu pääsee kastumaan rakenteessa vain toiselta puolelta. Käyristyminen johtuu yksittäisten viilujen eritasoisesta paisumisesta. Lisäksi liiallinen kosteus voi hajottaa viilupuun rakennetta, jolloin pintaviilut voivat irrota. (Metsä Wood, 2021) Liimapuussa ei juurikaan esiinny käyristymistä tai vääntymistä. Epätasaista kosteuselämistä vähentää lamellien suuntaus ja lamellien sama kosteuspitoisuus valmistusvaiheessa. Toisiinsa liitettävillä lamelleilla saa olla enintään 5 prosentin kosteusero. (Riipola, K., ym., 2014, s. 24.)

Viilu- ja liimapuuhun verrattuna massiivipuinen CLT-levy toimii rakenteessa eritavoin, vaikka puun materiaaliominaisuudet ovatkin samat. CLT-levy toimii rakenteessa höyrynsulkuna, koska puukerrokset muodostavat liimakalvojen kanssa tiiviin rakenteen. Lämmin ja kostea sisäilma ei siis pääse vapaasti virtaamaan CLT-levyn ulkopuolelle asennettuun eristeeseen. Puun hygroskooppisuuden vuoksi kosteuden hidaskiirtyminen CLT:n kerrosten läpi molempiin suuntiin on kuitenkin mahdollista. Tämä ominaisuus parantaa rakenteen kosteusteknistä toimintaa eli rakenteeseen päätyneen kosteuden on mahdollista kuivua. (CrossLam Kuhmo Oy, n.d.) Puun huokoisuuden takia sen lämmöneristyskyky on suhteellisen hyvä verrattuna esimerkiksi betoniin (Siikainen, 2008, s. 44). Tämä ominaisuus tulee erityisesti esille CLT:stä

tehdyissä rakenteissa, joissa CLT parantaa rakenteen kokonaislämmöneristävyyttä. (CrossLam Kuhmo Oy, n.d.)

6 ULKOSEINÄRAKENNE

Ulkoseinän rakenteeseen vaikuttaa rakennuksen runkoratkaisu ja mitä insinööripuutuotetta siihen on käytetty. Karkeasti määritettynä puukerrostalon ulkoseinien runkorakenne koostuu sisältä ulospäin seuraavasti kerroksista: sisäverhous, suojaverhous, ilman- ja höyrünsulku, lämmöneristys ja tuulensuoja. Tuulensuojan jälkeen tulee tuuletusväli ja sen jälkeen ulkoverhoilu eli julkisivu. Kuvassa 12 olevissa rakenneleikkauksissa on ranka- ja CLT-runkoisen ulkoseinän rakenne. Vasemmalla puolella on rankarunkoinen ulkoseinä ja oikealla puolella CLT-runkoinen ulkoseinä. (Tolppanen, ym., 2013, s. 57.)



Kuva 12. Ranka- ja CLT-runkoisten ulkoseinien rakenne (Tolppanen, ym., 2013, s. 57).

CLT-runkoisessa seinässä erillistä ilman- ja höyrünsulkukerrosta ei tarvita, koska CLT-massiivipuulevy toimii itse huokoisena ilman- ja höyrünsulkukerrosena. Lämmöneriste asennetaan aina CLT:n ulkopuolelle. (Tolppanen, ym., 2013, s. 56-57).

Seuraavissa kappaleissa käydään läpi ulkoseinän rakennekerroksien merkitys rakenteen toiminnan kannalta ja kosteusteknisen toimivuuden asettamat vaatimukset.

6.1 Julkisivuverhoilut

Ulkoverhouksen tärkein tehtävä on suojata sen alla olevia rakennekerroksia ilmaston aiheuttamilta rasituksilta. Ilmastonmuutoksen vuoksi julkisivuihin kohdistuvat rasitukset voimistuvat. Tämä lyhentää julkisivun odotettua käyttöikää. (Laamanen, ym., 2022, s. 77) Erityisesti etelänpuoliset, mutta myös lounaan ja lännen suuntaan olevat julkisivut joutuvat suurimpaan rasitukseen. Samoin aukeilla paikolla julkisivuihin kohdistuu enemmän viistosadetta, tuulta ja aurinгон paistetta kuin suojaisimmilla paikoilla oleviin. Nämä ilmaston aiheuttamat rasitukset vaikuttavat merkittävästi koko ulkoseinärakenteen toimintaan ja ne onkin otettava huomioon suunnittelussa. (Siikainen, 2008, ss. 267-268.) Seinärakenne onkin tärkeää suunnitella mahdollisimman vikasietoiseksi. Julkisivuun osuvan sadeveden vaikutusta voi vähentää riittävän pitkillä räystäillä. Lisäksi yksityiskohtien ja liitoksien suunnitteluun ja tekoon on kiinnitettävä huomiota, ettei niiden kautta pääse seinärakenteeseen ylimääräistä kosteutta. Kaikessa julkisivuihin liittyvässä suunnittelussa on muistettava ottaa huomioon tuulen vaikutuksesta ylöspäin kulkeutuva vesi. (Laamanen, ym., 2022, ss. 77-78.) Lisäksi ulkoverhous vaikuttaa merkittävästi rakennuksen ulkonäköön ja onkin siksi oleellinen osa rakennuksen arkkitehtuuria. (Siikainen, 2008, s. 267.) Tähän opinnäytetyöhön on valittu neljä erilaista ulkoverhoiluvaihtoehtoa, joissa kaikissa on omat materiaaliin liittyvät erityispiirteensä. Yhteistä niille kuitenkin on, että kaikki julkisivut toteutetaan tuulettuvana. Ulkoverhoiluvaihtoehdot esitellään lyhyesti seuraavana omissa alakappaleissaan.

6.1.1 Maalattu puuverhoilu

Puuverhoilu tehdään yleensä kuusesta tehdystä laudasta, mutta mäntyäkin voidaan käyttää (Siikainen, 2008, s. 269.). Puun lajista riippumatta ulkoverhouslaudat pitäisi aina olla tehty sydänpuusta. Sydänpuu on puun

keskiosassa olevaa kovaa ja kestävää kuollutta puuainesta. Männyn sydänpuussa pihka on tukkinut puun solukon ja kuusen sydänpuussa solukko on sulkeutunut kokonaan puun kuivuessa. Nämä seikat tekevät sydänpuusta erityisen säänkestävää. (Siikainen, 2008, ss. 24-25.) Puussa tapahtuu aina jonkin verran kosteuselämistä ja laudan tapauksessa se on kovertumista tai kupertumista. Lauta pitää asentaa sydänpuu ulospäin, jolloin lautojen saumat pysyvät tiiviinä kosteuselämisestä huolimatta. (RT 82-10829, 2004, s. 3.) Ulkoverhouslaudat voidaan maalata joko käsin työmaalla tai teollisesti heti höyläämöllä. Teollinen pintakäsittely nopeuttaa rakentamista rakennuspaikalla ja tuottaa parempaa laatua, kun käsittelyolosuhteet ovat vakioidut ja valvotut. Vaikka nykyisin pohjamaali ja ensimmäinen pintamaalikerros levitetään höyläämöllä, se ei kokonaan poista rakennuspaikalla tehtävää viimeistelymaalausta. (Tolppanen, ym., 2013, s. 82.) Perinteisesti ulkoverhousmaalina on käytetty öljymaaleja. Se tekee puun pinnalle tiiviin pinnan, joka ei päästä kosteutta läpi. Öljymaali on oikein pohjustettuna ja käytettynä oikein hyvä pinnoite puiselle julkisivulle. (Siikainen, 2008, s. 190.) Nykyisin on kehitetty hengittäviä akrylaattimaaleja, jotka mahdollistavat puun kuivumisen myös ulospäin. Nämä maalit ovat lisäksi joustavia ja niillä on hyvä säänkesto ja värisävyjen pysyvyys. (Tolppanen, ym., 2013, s. 82.)

Korkeissa julkisivuissa julkisivulaudat joutuvat kovalle säärasitukselle. Tämän vuoksi niissä suositellaan käytettäväksi vähintään 28 millimetriä paksua lautaa. Paksumpi lauta pystyy paremmin tasaamaan kosteutta ja kosteuseläminen on vähäisempää. Käytännössä sahatavarasta tehdyt laudat olisivat esimerkiksi 32 millimetriä paksuja ja 150 millimetriä leveitä ja muotoon höylätyt laudat 28 millimetriä paksuja ja 170 millimetriä tai 195 millimetriä leveitä. (RT 82-10829, 2004, s. 3.) Lisäksi suositellaan vähintään 0,4 metriä leveitä räystäitä. Ulkoverhous voidaan toteuttaa eri suuntaisella laudoituksella. Laudan suunnasta riippuu, millainen koolaus tulee tehdä. Pystylaudoitusta eli pystyverhous vaatii ristikoolauksen, joka on toteutettava niin, että pystysuoratuuletus on mahdollista. Vaakaan tuleville ulkoverhoilulautoille riittää yksinkertainen pystykoolaus. (Siikainen, 2008, s. 270.) Puujulkisivun taakse riittää 20 millimetrin tuuletusväli (Åström, ym., 2020, s. 125). Ulkoverhouslautojen kiinnityksen takia koolauksen käytettävien lautojen tulee kuitenkin olla vähintään yhtä

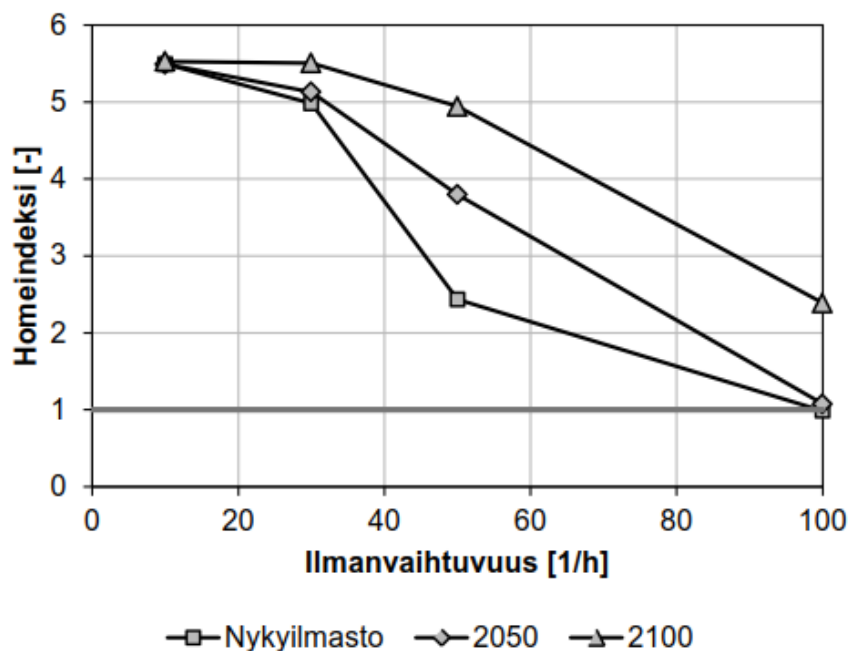
paksu kuin ulkoverhouslauta. Koska kerrostaloissa käytetään vähintään 28 millimetriä paksua lautaa, pitää koolauksen ja tuuletusvälin olla vähintään yhtä paksu, mutta mieluummin paksumpi. (Puuinfo, n.d., s. 2.) Palomääräysten mukaan tuulensuojalevyn pitää olla palamaton ja suojata runkoa palolta. Lisäksi tuuletusväliin on asennettava vaakasuorat palokatkot kerroksittain. Nämä palokatkot huonontavat ilman liikkumista tuuletusvälissä. Tuuletuksen turvaamiseksi palokatkoihin voidaan tehdä pieniä reikiä, kuitenkin niin, että palon leviäminen saadaan estettyä. (Åström, ym., 2020, s. 125.)

6.1.2 Tiiliverhoilu

Julkisivujen muuraamiseen voidaan käyttää poltettua tiiltä tai kalkkiehkekatiiltä eli kahitiiltä. Poltettujen tiilien pääraaka-aine on savi (Siikainen, 2001, s. 76). Kalkkiehkekatiilet valmistetaan seoksesta, jossa on kvartsipitoista hiekkaa, sammuttamatonta kalkkia ja vettä. Poltettujen tiilien tapaan nekin puristetaan kokoon, mutta polttamisen sijasta kahitiilet karkaistaan. (Siikainen, 2001, s. 98). Tiilien lisäksi muuraamiseen käytetään laastia, jolla tiilet liitetään yhteiseksi muuriksi. Tiilet imevät vettä sisäänsä ja niiden kosteuspitoisuus vaihtelee ilmankosteuden mukaan. Tämä ominaisuus täytyy huomioida rakennetta suunniteltaessa muun muassa riittävän isolla tuuletusvälillä. (RT 103282, 2020, s. 2) Muurauvaiheessa on huolehdittava, että laasti ei tuki tuuletusväliä, eikä osu takana olevaan tuulensuojalevyyn, jolloin kosteus voisi siirtyä kapillaarisesti muurista seinärakenteeseen. Lisäksi ensimmäisessä tiilikerroksessa jätetään tuuletuksen vuoksi joka kolmas pystysauma ilman laastia. (RT 103282, 2020, s. 13)

Tiiliverhoilun takana on hyvät olosuhteet homeen kasvulle jo nykyisissä olosuhteissa. Matalan alle 10 metriä korkean tiiliverhoilun vikasietoisuutta voidaan parantaa tuulensuojan lämmönvastusta parantamalla ja valitsevalle seinärakenteeseen huonosti homehtuvia materiaaleja. (Vinha, ym., 2013, s. 174.) Lisäksi tuuletusvälin pitää olla vähintään 40 millimetriä ja tiilen vähintään 120 millimetriä paksu. Laastiksi valitaan tiivissaumalaasti ja muuraus suoritetaan huolellisesti niin, että saumat pysyvät täysinä. Lopuksi saumat tiivistetään.

(Laamanen, ym., 2022, s. 91.) Korkea eli yli 10 metrinen tiiliverhoilu on kosteusteknisesti vielä haastavampi kuin matalampi tiiliverhoilu. Kuvassa 13 olevasta kuvaajan pystysarakkeesta voidaan nähdä, että runkotolpan ulkopinnassa on jo nykyolosuhteissa korkea homeindeksi-arvo eli runkotolpassa voidaan havaita voimakasta homeen kasvua. Ilmastonmuutos pahentaa tilannetta, kun sademäärät ja erityisesti viistosateet lisääntyvät. Tilannetta saadaan korjattua parantamalla tuuletusvälin ilman vaihtuvuutta, joka on kuvaajassa vaakasarakkeessa. Ilmanvaihtuvuutta ei voida kuitenkaan loputtomasti parantaa, joten lisäksi tarvitaan rakenteellisia muutoksia. (Vinha, ym., 2013, s. 179.)

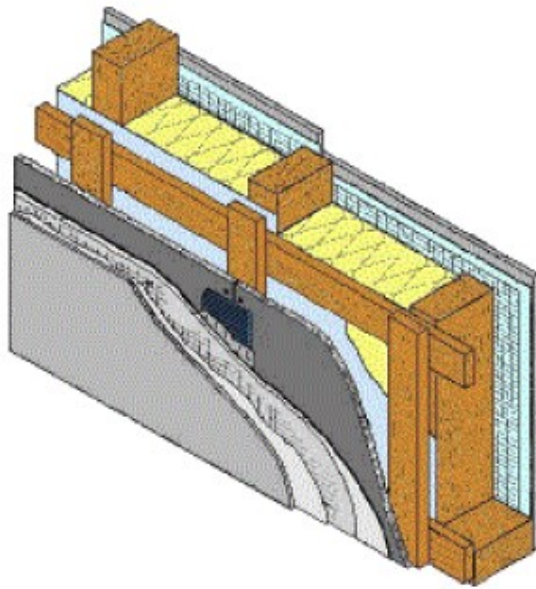


Kuva 13. Homeindeksi tiiliverhoillun seinän runkotolpassa (Vinha, ym., 2013, s. 179).

Yli 10 metriä korkea tiiliverhoilua ei suositella puurunkoiseen rakennukseen (Laamanen, ym., 2022, s. 91). Mikäli sellainen kuitenkin halutaan toteuttaa, täytyy seinärakenne suojata sadetakkipellityksellä. Sadetakkipeltinä voidaan käyttää tiivistä kuumasinkittyä teräsosutlevyä. Se kiinnitetään seinärunkoon esimerkiksi teräsorsin, jotka kulkevat pystysuorassa niin, että väliin jää vähintään 20 millimetrin tuuletusrako. Tiiliverhoilu tulee sadetakkipellin toiselle puolelle niin, että väliin jää vähintään 30 millimetrin tuuletusrako. Sadetakkipellin takana oleva seinärakenne voidaan toteuttaa samoin kuin puuverhoiltu ulkoseinä. (Vinha, ym., 2013, ss. 179-180.)

6.1.3 Levyrapattu ulkoverhoilu

Julkisivun levyrappaus tehdään sementtipohjaisen rakennuslevyn päälle ohutrappauksella (Knauf, n.d.-a, s. 2). Se tarkoittaa, että rappausalustana toimivan levyn päälle tehdään vain yksi rappauskerros erityisesti ohutrappaukseen tarkoitetulla laastilla (Siikainen, 2001, s. 110). Rakennuslevyt asennetaan ulkoseinään koolauksien päälle niin että julkisivurakenteesta tulee tuuletettava. Sementtipohjaiset rakennuslevyt ovat palamattomia, kestäviä, eikä kosteus aiheuta niiden rakenteeseen muutoksia. (Knauf, n.d.-a, s. 19.) Kuvassa 14 on havainnekuva levyrapatusta ulkoverhoilusta.



Kuva 14. Levyrapattu ulkoverhoilu (Knauf, n.d.-b).

Levyt on asennettava ja saumattava huolellisesti, jotta levytys suojaa runkoa sään aiheuttamilta rasituksilta, eikä tuuletusväliin pääse ylimääräistä kosteutta (Knauf, n.d.-b). Tuulettuva rakenne mahdollistaa rakenteen kuivumisen, vaikka kosteutta pääsisi rapatun levyn taakse pienistä halkeamista. Levyrappauksen takana olevan seinän rakenne voidaan toteuttaa samanlaisena kuin puuverhoilussa ulkoseinässä. (Vinha, ym., 2013, s. 182.) Kuitusementtilevyjä voidaan käyttää julkisivuverhoiluna myös yksinään ilman päälle tulevaa rappautusta (Siikainen, 2001, s. 172). Niiden päälle voidaan kiinnittää myös ohuttiverhoilu tai keraaminen laatta (Knauf, n.d.-a, s. 10).

6.1.4 Metalliverhoilu

Metallinen ulkoverhoilu voidaan toteuttaa, joko julkisivukasettien tai -lamellien avulla. Näiden lisäksi on saatavilla erilaisia poimulevyjä. Lamellit ovat pitkiä levyjä, joissa on särmäykset pitkällä sivuilla. Kasetit ovat lamelleja lyhyempiä metallilevyjä, joissa kaikki reunat ovat särmättyjä. Lamelleja voidaan käyttää julkisivussa, joko vaaka- tai pystysuunnassa. Metallisia julkisivutuotteita on saatavissa useilla erilaisilla profiileilla ja väreillä. Rakennukseen on siis mahdollista suunnitella hyvin erityyppisiä ulkonäköjä. (Ruukki, n.d.) Metallinen ulkoverhoilu voidaan tehdä teräksestä, alumiinista tai kuparista (RT 82-10429, 1990, s. 2; Siikainen, 2001, ss. 192, 204, 212).

Metalliverhoilu on säänkestävä ja oikein tehtynä estää veden pääsyn takana olevaan seinärakenteeseen. Lamellien ja kasettien saumojen, sekä julkisivun aukkojen ja reunojen tekoon on kiinnitettävä erityistä huomiota, ettei vesi pääse niiden kautta rakenteisiin. Lisäksi liitosten suunnittelussa pitää huomioida metallien voimakkaat lämpöliikkeet. Liitosten suunnitteluun ja asennukseen liittyvät ohjeet ovat tuotekohteisia, ja ne on aina tarkistettava valmistajalta. Metallijulkisivu tehdään aina tuulettavana, jolloin levyn takapintaan mahdollisesti kondensoituvan tai saumojen kautta levyn taakse pääsevän veden on mahdollista kuivua aiheuttamatta kosteusvaurioita takana olevaan rakenteeseen. (RT 82-10429, 1990, s. 6.)

6.2 Tuuletusväli

Puurunkoinen ulkoseinä on toteutettava aina tuulettavana. Tuuletusvälin tulee olla vähintään 20 millimetriä, mutta julkisivuverhoilu määrittää tarkemmin vaadittavan tuuletusvälin. Tuuletusväli toteutetaan niin että ilmavirta pääsee kulkemaan pystysuorasti alhaalta ylöspäin. Tämän saadaan aikaiseksi pystykoolauksen avulla. Tuuletusväli voidaan suurentaa esimerkiksi vaakakoolauksen avulla, joka mahdollistaa tuulettumisen myös sivusuunnassa. Tuuletusväli mahdollistaa ilmavirran, joka kuivattaa julkisivun taakse päässeeseen ylimääräisen kosteuden. Kosteus voi olla esimerkiksi rakennekosteutta tai sateen aikana julkisivun taakse joutunutta vuotovettä. (Laamanen, ym., 2022, s. 88.)

6.3 Tuulensuojalevy

Rakenteen ulkopinnassa oleva tuulensuojalevy suojaa takanaan olevaa eriste-kerrosta ja koko rakennetta ilmavirtauksien haitallisilta vaikutuksilta. Tuulensuojalevyn pitää olla riittävän huokoista materiaalia, jotta se ei estä rakenteen kuivumista ulospäin. Erityisesti puurankarakenteiden kohdalla tuulensuojalevyn täytyy myös eristää mahdollisimman hyvin lämpöä ja olla palomääräysten mukaan palamatonta materiaalia. (Laamanen, ym., 2022, s. 31.) Sen kokonaislämmönvastuksen täytyy olla vähintään $0,5 \text{ m}^2\text{K/W}$ ja vesihöyrynvastuksen enintään $1,0 \times 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$. (Åström, ym., 2020, s. 134; Laamanen, ym., 2022, s. 43). Tämä vastaa noin 20 millimetrin kerrosta mineraalivillaista tuulensuojalevyä. Tuulensuojalevyn tarjoama lisälämmöneristys pitää sisemmät rakenneosat lämpimämpinä, jolloin kosteuden tiivistyminen rakenteen sisäosissa vähenee. (Laamanen, ym., 2022, s. 31.) Massiivipuusta tehty CLT-rakenne ei tarvitse erillistä tuulensuojalevyä, mikäli eristykseen käytetään jäykkää kivivillaeristyslevyä. Tämä kerros toimii myös ulkopuolisena palosuojakerroksena. CLT-rakenne voidaan lämmöneristää pehmeällä mineraalivillalla, jolloin se tarvitsee suojakseen tuulensuojalevyn. (Tolppanen, ym., 2013, s. 57, 143.) Tuulensuojan on kestävä kosteutta. Niiden kosteuden kestävyys arviointiin käytetään homemallia, jossa rakennusmateriaalit on jaettu homehtumisherkkyuden mukaan luokkiin, joita ovat HHL1, HHL2, HHL3 ja HHL4. Näistä HHL1 -luokan materiaalit ovat hyvin herkkiä homehtumaan ja HHL4 -luokan materiaalit ovat kestävimpiä eli eivät käytännössä homehdu. Puuverhoiluissa ulkoseinissä tuulensuojan on oltava HHL2 -luokkaan kuuluva. (Laamanen, ym., 2022, s. 40.)

Matalat alle 10 metriset tiiliverhoillut ulkoseinät voidaan toteuttaa ilman sadetakkipeltiä. Näissä seinissä tuulensuojalevytyksen kokonaislämmönvastuksen tulee olla vähintään $3,0 \text{ m}^2\text{K/W}$. Tähän arvoon päästään noin 100 millimetriä paksulla mineraalivillatuulensuojalevyllä (Åström, ym., 2020, s. 134). Lisäksi tuulensuojalevyn täytyy kuulua vähintään homehtumisherkkyysluokkaan HHL3. Korkeissa yli 10 metrisissä tiiliverhoiluissa seinissä vaaditaan tiilijulkisivun taakse ohutlevystä tehty sadetakkipelti. Sadetakkipellin takana olevalle

tuulensuojalevyille ei anneta erityisiä ohjeita, vaan se voidaan toteuttaa tavallisten vaatimusten mukaisena. (Laamanen, ym., 2022, s. 40.)

6.4 Lämmöneristeet

Lämmöneristeiden tärkein tehtävä on vähentää lämmön siirtymistä rakenteiden läpi. Eristeet on asennettava huolellisesti, niin ettei niiden väleihin jäisi rakoja eikä muita kylmäsiltoja. (Åström, ym., 2020) Palomääräysten takia puukerrostalossa käytetään ulkoseinien eristeissä palamatonta mineraalivillaa. Se on epäorgaanisesta kuidusta sulattamalla ja linkoamalla tehty lämmöneriste. Suomessa valmistetaan kivi- ja lasivillaa. Lämmöneristyskyky perustuu huokoiseen rakenteeseen, jossa ilma on paikallaan pysyvää. Pääasiassa eristekerros pitää sijoittaa rakenteen sisäosiin tuulensuojaan, jotta eristävyyskyky säilyy. Tämä koskee erityisesti pehmeitä mineraalivillaeristeitä. Kovilla mineraalivillaeristeillä ilmanläpäisevyys on niin heikko, että niitä voidaan käyttää tuulensuojalevyinä. Vesihöyry ei tiivisty mineraalivillaan, vaan kulkeutuu sen läpi. Rakenteessa on huolehdittava, että mineraalivilla pääsee kuivumaan rakenteessa ulospäin. Kostealla mineraalivillalla on huonompi lämmöneristyskyky kuin kuivalla. Kosteus ei aiheuta mineraalivillan lahoamista tai mätänemistä. Liian kosteissa olosuhteissa mineraalivillaan voi kuitenkin kasvaa sieni- tai homekasvustoa. (Siikainen, 2001, s. 217-220.)

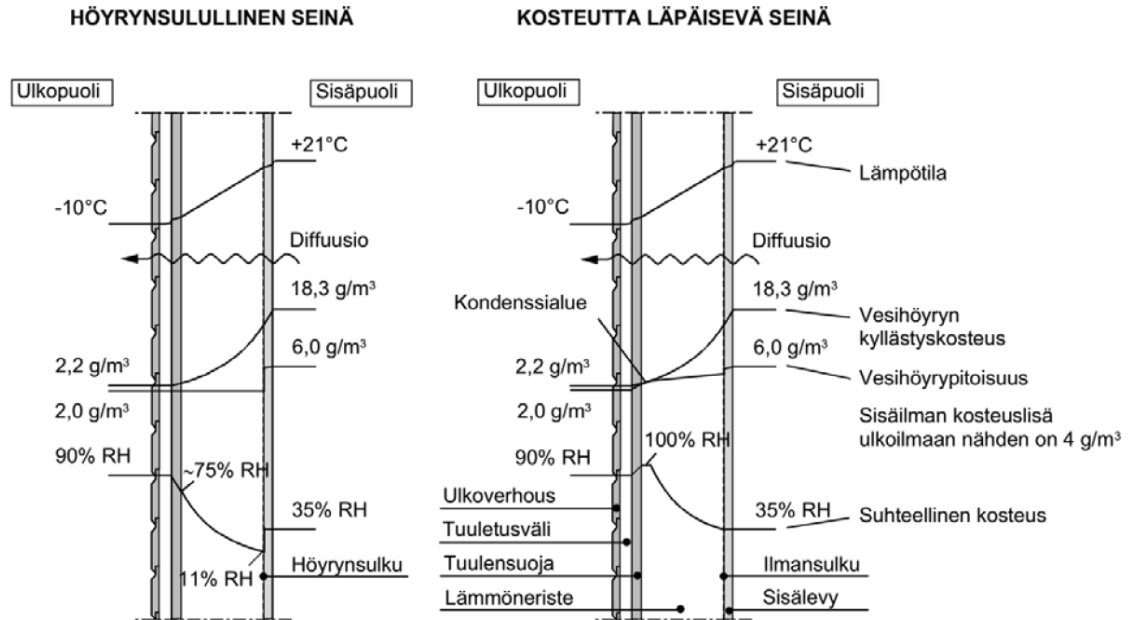
Ulkoseinissä eristekerroksen paksuus on yleensä 225-260 millimetriä. CLT-rakenteisessa seinässä eristettä tarvitaan vähemmän, koska CLT-massiivipuulevy toimii itsekin lämmöneristeenä. CLT-seinään riittää 200-225 millimetrin eristekerros. (Tolppanen, ym., 2013, s. 56-57). CLT-runkoisessa ulkoseinässä eriste on laitettava runkorakenteen ulkopuolelle. Massiivipuu rakenteisen seinän kosteustekninen toiminta huonontuu merkittävästi, jos eristekerros sijaitsee rakenteen sisäpuolella. (Lahdensivu, ym., 2012, s. 55-56; Vinha, ym., 2013, s. 183.) Rankarunkoisessa seinässä osa lämmöneristeestä voi sijaita höyryn- ja ilmansulkukerroksen sisäpuolella niin sanotussa asennustilassa. Tämän avulla rakennusten energiatehokkuutta saadaan parannettua. Lisäksi asennustila mahdollistaa esimerkiksi sähköistyksen teon rikkomatta höyryn- ja

ilmansulkukerrosta. Asennustilassa oleva eristekerros ei saa olla liian paksu, koska silloin vesihöyry saattaa tiivistyä höyrynsulun sisäpintaan. Turvallisena rajan pidetään, että 75 prosenttia eristeestä sijaitsee höyrynsulun ulkopuolella. Käytännössä asennustila ja siinä oleva eristyskerros ei saa olla paksumpi kuin 50 millimetriä. Silloinkin seinän kosteustekninen toimivuus on varmistettava erikseen rakennusfysikaalisin lakelmin. (Åström, ym., 2020, s. 127.) Paksuissa yli 200 millimetrisissä pystysuorissa eristekerroksissa syntyy luonnollisia konvektiovirtauksia, jotka heikentävät eristeen lämmöneristyskykyä. Ilmiö saadaan poistettua kerrostalon korkeista seinistä katkaisemalla eriste välipohjien kohdalla. Mikäli rakennuksessa ei ole välipohjaa, jolla eriste voitaisiin katkaista, tarkoitukseen voidaan käyttää konvektiokatkona rakennuspaperia. Rakennuspaperi on ilmatiivis, mutta vesihöyryä läpäisevä. (Tolppanen, ym., 2013, s. 59.)

6.5 Höyryn- ja ilmansulku

Höyrynsulku estää sisäilman kosteutta kulkeutumasta diffuusion avulla rakenteisiin. Ilmansulun tarkoitus puolestaan on estää ulko- ja sisäilman paineroista johtuvia haitallisia ilmavirtauksia. Käytännössä nämä ovat useimmiten sama rakennekerros. Massiivipuinen CLT-rakenne toimii yksinään höyryn- ja ilmansulkukerrosena, eikä tarvitse erillistä rakennetta sitä varten. Rankarakenteisessa seinässä toimii kalvo tai levy, jonka avulla rakenteesta saadaan riittävän tiivis. (Åström, ym., 2020, s. 126.) Höyrynsululla on suuri merkitys rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta. Kuvassa 15 on verrattu rankarakenteisen seinän kosteusteknistä toimintaa talvella, kun toisessa seinässä on höyrynsulku ja toisessa pelkkä ilmansulku. Sisäilman lämpötila on +21 °C ja ulkoilman -10 °C. Sisäilman kosteus on 4 g/m³. Sisäilman suhteellinen kosteus on 35 prosenttia ja ulkoilman 90 prosenttia. Sisäilman kosteus pyrkii siirtymään diffuusion avulla rakenteessa ulospäin samalla kun lämpötilarakenteen sisällä laskee. Kosteutta läpäisevässä seinässä tapahtuu kosteuden kondensoitumista eristeen ulkoreunassa, koska ilman suhteellinen kosteus ylittää 100 prosentin arvon. Höyrynsulullisessa seinässä sisäilman kosteus ei pääse kulkeutumaan rakenteeseen, jolloin suhteellinen kosteus jää eristeen

ulkoseinässä 75 prosenttiin, eikä kastepistettä saavuteta. Höyrynsulullinen seinä pysyy kuivana, kun taas kosteutta läpäisevä seinää pääsee kastumaan. (Vinha, ym., 2013, s. 168.)



Kuva 15. Höyrynsulullisen ja kosteutta läpäisevän ulkoseinän kosteustekninen toiminta (Vinha, ym., 2013, s. 168).

Höyrynsulun vesihöyryvastusarvona (Z_p) on suositeltavaa käyttää ulkoseinissä ja alapohjassa vähintään arvoa $10 \times 10^9 \text{ m}^2 \text{ sPa/kg}$. Ulkoseinissä voidaan käyttää myös tätä pienempää arvoa, mutta ei kuitenkaan alle $2,5 \times 10^9 \text{ m}^2 \text{ sPa/kg}$. Rakenteen kosteustekniseen toimintaan saadaan lisävarmuutta, kun käytetään suositeltua vesihöyryvastusarvoa. Mikäli vaipparakenteessa on käytetty avohuokoista lämmöneristettä, täytyy sen sisäpuolella olevan höyrynsulun olla vähintään viisinkertainen verrattua ulkopuolella olevaan tuulensuojalevyyn. (Laamanen, ym., 2022, s. 34.) Rungon sisäpuolella olevalla ilmansululla pyritään tekemään rakennuksen koko ulkovaipasta mahdollisimman tiivis, jolloin koko rakennuksen ilmanvuotoluvuksi q_{50} suositellaan arvoa $1,0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$. Tämä mahdollistuu, kun ilmansulun ilmanläpäisyvastus S_a on vähintään $1,0 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ sPa/m}^3$. Ilmansulun tärkein ominaisuus on kuitenkin liitos- ja läpivientikohtien tiivistettävyyden. Materiaalin tulee olla helposti liitettävää ja saumattavaa. (Laamanen, ym., 2022, s. 39.)

Seiniin, joissa on tiiliverhoilu, eikä sen takana ole käytetty sadetakkipeltiä, suositellaan hygrokalvoa perinteisen höyrynsulkukalvon tilalle. Hygrokalvon vesihöyrynvastus pienenee, kun ilmansuhteellinen kosteus kasvaa. Tämä ominaisuus mahdollistaa tiiliverhoillun seinän kuivumisen sisäänpäin. (Laamanen, ym., 2022, s. 33.) Tämä on tärkeää erityisesti kesäisin eteläpuoleisen tiiliseinän kosteusteknisen toimivuuden kannalta. Viistosade kastelee tiilet ja aurinгон lämmön vaikutuksesta kosteus siirtyy tiilessä sisäänpäin. Kesäaikana sisäilman viilennys pahentaa tilannetta. (Vinha, ym., 2013, s. 87; Laamanen, ym., 2022, s. 91.) Tulevaisuuden ilmastolla tehtyjen laskennallisten tarkastelujen mukaan tämä aiheuttaa kosteuden tiivistymistä rakenteisiin. Todellisuudessa tämä ei kuitenkaan ole niin iso ongelma, koska laskennassa käytetään tyypillisesti sisäilmalle 21 asteen lämpötilaa. Käytännössä sisäilman lämpötila on tätä suurempi viihtyvyyssyistä, jolloin sisä- ja ulkoilman lämpötilaero ei ole niin suuri. Lisäksi jäähdytyslaite kuivaa sisäilmaa kondenssikuvaimella. Mikäli sisäilma kesäisin on liian kostea rakenteiden toiminnan kannalta, sitä voidaan kuivata lisää erillisellä kuvaimella. (Laamanen, ym., 2022, s. 23.)

6.6 Sisä- ja pintaverhoilu

Palomääräyksien mukaan puinen runkorakenne on pääasiassa palosuojattava palosuojaverhouksella. Käytännössä se voidaan toteuttaa kipsilevytyksellä, joka on 3-4 -kerroksisessa rakennuksessa 15 millimetrinen palosuojakipsilevy ja 5-8 -kerroksisessa rakennuksessa 18 millimetriä paksu kuitukipsilevy. (Tolppanen, ym., 2013, s. 143). Kipsin paloeristyskyky perustuu siihen sitoutuneena olevaan kideveteen. Levy ei syty palamaan, mutta sen lujuus vähenee sitä mukaa, kun kidevettä poistuu. Riittävän paksu kipsilevytyks hidastaa kuitenkin paloa riittävästi. (Siikainen, 2001, s. 225.)

Kosteusteknisesti sisäverhoiluna käytettävät kipsilevyt ovat vesihöyryä läpäiseviä (Siikainen, 2001, s. 225.). Sisäpuolisella palosuojalevytyksellä ei ole suurtakaan merkitystä rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta, koska se sijaitsee höyrynsulkukerroksen sisäpuolella. Muillakaan hyvin vesihöyryä-läpäisevillä pinnoitteilla kuten maaleilla ja tapeteilla ei ole merkitystä rakenteen

kosteusteknisen toiminnan kannalta. (Åström, ym., 2020, s. 127.) Poikkeuksen tekevät märkätilat. Niihin tehtävä vedeneristys vaikuttaa ulkoseinän rakentamiseen. Käytännössä höyrynsulku jätetään rakenteesta pois vedeneristyksen hoitaessa samaa asiaa. Ilmansulku täytyy kuitenkin kattaa tasaisesti koko väli, joten märkätilojen kohdalle ulkoseiniin laitetaan ilmansulkupaperia. (Laamanen, ym., 2022, s. 180.) Tarkempia ohjeita märkätilojen vesieristykseen löytyy lisäksi lähteistä (Tolppanen, ym., 2013) ja (Åström, ym., 2020).

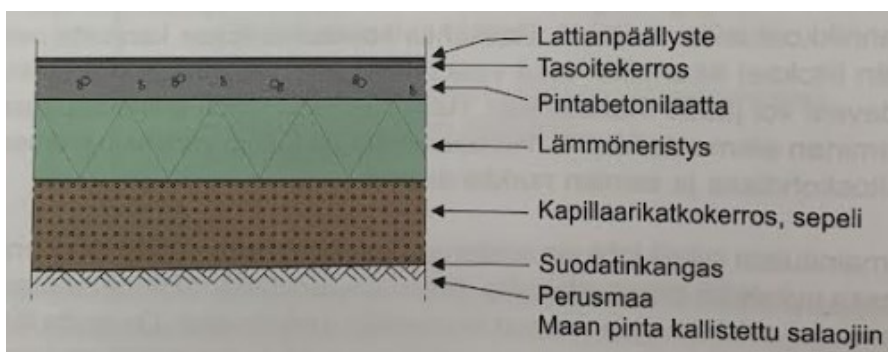
7 ALAPOHJARAKENTEET

Puukerrostaloon voidaan toteuttaa alapohja maanvaraisena tai tuulettavana. Kaikkien alapohjarakenteiden kosteustekninen toimivuus perustuu hyvin tehtyyn rakennuspohjan kuivatukseen, sekä sade- ja sulamisvesien poistoon. Tämä toteutetaan käytännössä salaojituksella sekä maaperän muotoilulla ja kallistuksilla. (Laamanen, ym., 2022, s. 57.) Maan olosuhteiden vaihtelut ovat hitaampia kuin ulkoilman. Tästä aiheutuu toteutustavasta riippuen erilaisia haasteita alapohjien kosteustekniselle toiminnalle. (Vinha, ym., 2014, s. 151.)

7.1 Maanvastainen alapohja

Ympäristöministeriö on antanut asetuksen rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta. Sen mukaan lattian yläpinnan tulee olla vähintään 0,3 metriä rakennuksen ulkopuolella olevaa maanpintaa korkeammalla, kun kyseessä on maanvastainen lattiarakenne. Tämä asetus ei koske kokonaan tai osittain maanpinnan alapuolella olevia lattiaita. (782/2017, 5 luku § 18.) Maanvastaisen alapohjan rakenne on esitetty kuvassa 16. Alapohjan alapuolinen maaines poistetaan ja samalla tehdään maapohjaan kallistukset salaojia kohti. Maapohjan päälle tehdään vähintään 200 millimetriä paksu kapillaarikatko. Tässä käytetään riittävän karkeaa sepeliä, jolloin maaperässä oleva vesi ei pääse siirtymään ylöspäin alapohjarakenteisiin. Kapillaarikatkosoran yläpuolelle laitetaan tarpeen mukaan suodatinkangas, jolla estetään mahdollisen

tasoitushiekan sekoittuminen kapillaarikatkosoraan. Näiden päälle laitetaan lämmöneristeet. (Vinha, ym., 2014, s. 154.) Eristeenä käytetään EPS-eristyslevyjä ja eristepaksuus on 200-400 millimetriä. Eristekerroksen paksuus määräytyy muun muassa halutun U-arvon ja eristeen lämmönvastusarvon mukaan, joten lämmöneristeen määrä on suunniteltava kohde kohtaisesti. (EPS-rakennuseristeteollisuus, 2022) EPS-eriste on solupolystyreenistä lämpökäsittelyn avulla valmistettu valkoinen eristyslevy. Eristeen lämmönjohtavuus vaihtelee käyttötavan mukaan 0,033 - 0,050 W/m°C välillä. EPS-tuotteet luokitellaan käyttökohteen ja puristuskestävyyden mukaisesti luokkiin. Maanvastaisen alapohjan EPS-eristeiltä vaaditaan hyvää puristuskestävyyttä ja alhaista vedennimeytymiskykyä. (Siikainen, 2001, ss. 266-267.) Lopuksi päälle valetaan vähintään 80 millimetriä paksu teräsbetonilaatta, joka tasoitetaan ja päällystetään tarpeen mukaisesti (Åström, ym., 2020, s. 138).



Kuva 16. Maanvastainen alapohja (Åström, ym., 2020, s. 138).

Rakennus lämmittää ajan kuluessa allaan olevaa pohjamaata, jolloin maanvaraisen laatan fysikaalinen toiminta muuttuu jonkin verran. Kosteus nousee lämpimästä maasta helpommin rakenteisiin asti. Pohjamaan lämpeneminen on huomioitava erityisesti laatoissa, joissa on lattialämmitys. (Vinha, ym., 2014, s. 157.) Maanvaraisessa alapohjassa lämmöneristeen lisäys ei aiheuta kosteusteknisiä ongelmia. Paksun eristekerroksen alla pohjamaa pysyy viileämpänä, eikä diffuusio nosta vesihöyryä niin paljon yläpohjan teräsbetonilaattaan. (Lahdensivu, ym., 2012, s. 84.) Mikäli lattian pinnoite on tiivis, saattaa maasta nousut kosteus tiivistyä pinnoitteen alapintaan. Mikäli lattia pinnoite kuitenkin halutaan tiiviiksi, esimerkiksi märkätilojen vesieristyksen vuoksi, pitää huolehtia, että lämmöneristeiden vesihöyrynvastus on riittävän suuri ehkäisemään maakosteuden nousun rakenteisiin. Lämmöneristeen suuri vesihöyrynvastus

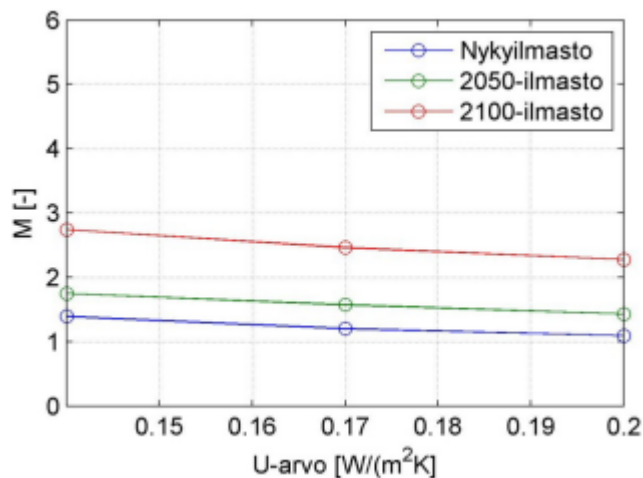
hidastaa rakennekosteuden kuivumista alaspäin. Rakennusvaiheessa on siis varattava riittävä aika betonilaatan kuivumiseen. (Vinha, ym., 2014, s. 156.) Vaikka rakenteen fysikaalisen toiminnan ja rakennuksen energiatehokkuuden kannalta paksu eristekerros on hyvä asia, niin se voi ajan kuluessa painua. Tämä aiheuttaa ongelmia lattiarakenteen tiiviydelle ja mahdollisesti myös eristekerroksessa kulkeville putkille. Eristeen puristuskestävyyden pitää olla riittävän suuri ja eristelevyjien täytyy olla kiinnitetty mekaanisesti betonilaattaan, jotta vältytään epätasaiselta painumiselta ja tyhjiltä tiloilta eristeiden väleissä. (Lahdensivu, ym., 2012, s. 84.)

7.2 Tuulettuva alapohja

Tuulettuva alapohja eli ryömintätilainen alapohja on rakenne, jossa maapohjan ja rakennuksen lattian välissä on tuuletustila. Tätä tuuletustilaa kutsutaan ryömintätilaksi. (Vinha, ym., 2013, s. 206.) Ympäristöministeriö on määritellyt asetuksessa rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta, että ryömintätilan korkeuden on oltava hävintään 0,8 metriä ja sinne täytyy päästä tekemään tarkastus ja huoltotöitä (782/2017, 5 luku § 20). Huolto- ja kunnossapitotöiden vuoksi suositellaan ryömintätilan korkeudeksi vähintään 1,2 metriä (Laamanen, ym., 2022, s. 67). Ryömintätilaan ei saa jättää orgaanista ainesta, eikä rakennusjätettä (Tolppanen, ym., 2013, s. 54). Ympäristöministeriön asetuksessa määrätään myös, että ryömintätilan on oltava hyvin tuulettuva, sinne ei saa kertyä vettä, eikä siellä oleva kosteus saa vaurioittaa yläpuolella olevia rakenteita. (782/2017, 5 luku § 19). Tuulettuva alapohja voidaan toteuttaa kahdella tavalla. Perinteinen tapa on eristää lattiarakenne hyvin ja tuulettaa alapuolella oleva ilmatila ulkoilmaan. Toinen tapa on tehdä niin sanottu lämmin alapohja. (Vinha, ym., 2013, s. 206.) Toteutettiinpa tuulettuva alapohja, millä ratkaisulla tahansa, se on suunniteltava kosteusteknisesti erittäin huolellisesti, että rakenteen toimivuus voidaan taata tulevaisuuden ilmastossa. (Vinha, ym., 2013, s. 212.)

Kuvassa 17 nähdään ulkoilmaan tuulettuvan alapohjan homeindeksin nousevan selvästi 2100-luvun ilmastoon mentäessä verrattuna nykyilmastoon.

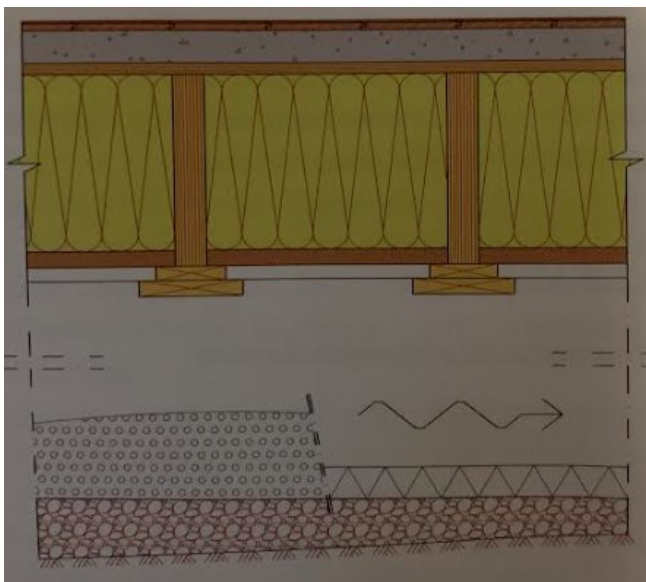
(Vinha, ym., 2013, s. 212.) Homeindeksi kertoo kuinka paljon rakennekerroksen pinnassa voidaan havaita homeen kasvua. Homeindeksin arvo 0 tarkoittaa, että rakennekerroksen pinta on puhdas, eikä homeen kasvua ole havaittu. Suurin indeksiarvo 6 puolestaan tarkoittaa, että rakennekerroksen pinta on voimakkaasti homekasvuston peitossa eli homeen kasvu on erittäin runsasta. (Tampereen yliopisto, n.d.) Lattiarakenteen eristeenä on käytetty mineraalivillaa ja homeindeksiarvo on mitattu lattiarakenteen alapinnassa olevasta tuulensuojalevystä. (Vinha, ym., 2013, s. 212.)



Kuva 17. Homeindeksi kylmässä tuulettuvassa alapohjassa (Vinha, ym., 2013, s. 212).

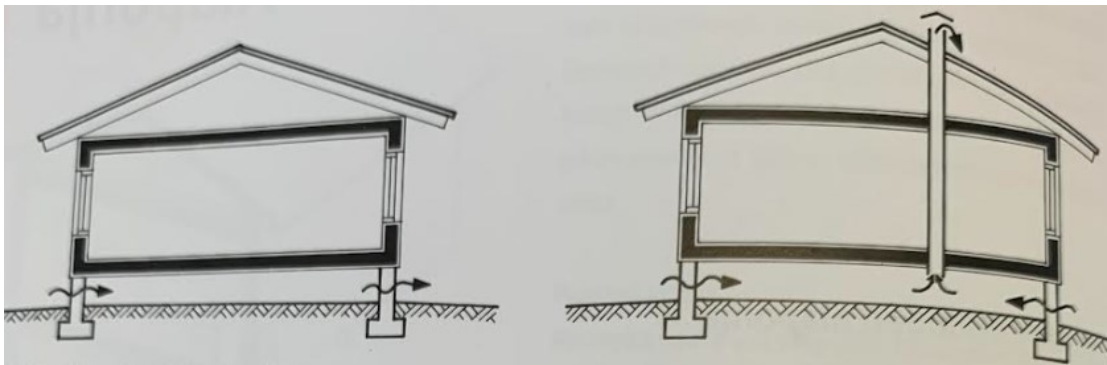
Kosteusteknisesti kriittisin aika tuulettuvalle alapohjalle on keväällä ja kesällä. Ryömintätilassa on talven jäljiltä kylmää, mutta ulkoilma alkaa lämmentä. Lämmin tuuletusilma jäähtyy ryömintätilassa ja sen suhteellinen kosteus nousee. Mikäli suhteellinen kosteus nousee 100 prosenttiin saavutetaan kastepiste ja ilmassa oleva kosteus alkaa tiivistymään ryömintätilan pinnoille. Keväällä ja kesällä tulee tilanteita, joissa ryömintätilaan tuleva tuuletusilma ei kuivaa, vaan päinvastoin kastelee ryömintätilaa. (Vinha, ym., 2014, s. 158.) Tuuletusilman kosteudesta syntyviä ongelmia pystytään ehkäisemään valitsemalla kosteutta kestävä tuulensuojalevy alapohjan alapintaan. Koneellinen ilmanvaihto nopeuttaa ilman liikettä. Näin ryömintätila lämpenee keväällä nopeammin ja kosteutta tiivistyy vähemmän. Maaperästä haihtuu kosteutta ryömintätilaan. Tätä pystytään vähentämään salaojituksella ja eristämällä ryömintätilan maanpinta. (Tolppanen, ym., 2013, s. 54-55.) Maanpinnan lämmöneristys voidaan toteuttaa 50-100 millimetrin kerroksella EPS-eristettä tai 200 millimetrin kerroksella

kevytsoraa. (Åström, ym., 2020, s. 141.) Kevytsora on valmistettu savesta polttamalla sitä pyörivässä uunissa. Kevytsoraa voidaan käyttää maaeristeenä tuulettuvissa ja maanvaraisissa alapohjissa. Kevytsora ei yksinään toimi kapillaarikatkona, joten rakenteessa sen alapuolelle on laitettava kapillaarikatkosoraa. (Siikainen, 2001, s. 118.) EPS-eristyslevy toimii vesihöyrynvastuksena muovin tavoin ja sen käyttöä suositellaankin vain, jos maaperän kosteuden tuotto on erittäin suuri. Muovin alapuolella maaperä pysyy kosteana ja olosuhteet homeen kasvulle ovat erittäin suotuisat. Eristys pitää pohjamaan lämpimämpänä, jolloin vesi ei haihdu niin helposti, ja parantaa näin alapohjan kosteusteknistä toimintaa. (Vinha, ym., 2013, s. 220.) Kuvassa 18 on esitetty kylmän tuulettuvan alapohjan rakenne. Alapohjan puurakenteet on suojattava alapuolelta kosteutta kestävällä ja vesihöyryäläpäisevällä tuulensuojalevyllä. Sen lämmönvastuksen täytyy olla vähintään 0,5 m²K/W, joka saavutetaan 20 millimetrin paksuisella mineraalivillalevyllä. (Åström, ym., 2020, s. 141.) Tuulensuojalevyn homehtumisherkkyysluokka on oltava vähintään HHL3 (Laamanen, ym., 2022, s. 40). Eristekerrokseen voidaan käyttää mineraalivillaa. Puurakenteisen alapohjan ilmatiivyyteen on kiinnitettävä erityistä huomiota. Ilmatiivistys toteutetaan alapohjan sisäpinnassa olevan höyryn- ja ilmansulkukerros avulla. (Åström, ym., 2020, s. 141.)



Kuva 18. Kylmä tuulettuva alapohja (Tolppanen, ym., 2013, s. 54)

Kylmän ryömintätilaisen alapohjan tuulettamista varten perusmuuriin tehdään tuuletusaukkoja. Tavoitteena on vaihtaa ryömintätilan ilma luonnollisesti eli ilman koneellista ilmanvaihtoa 0,5 – 1 kertaa tunnissa. Tuuletusaukot on sijoiteltava tasaisesti enintään 6 metrin välein perusmuurin jokaiselle reunalle ja aukkojen yhteenlaskettu pinta-ala pitää olla vähintään 1 promille alapohjan pinta-alasta. Mikäli rakennus sijaitsee tuulisella paikalla, tuuletusaukkojen määrää voidaan vähentää puoleen suosituksesta. Yksittäisen tuuletusaukon on oltava vähintään 150 neliösenttimetriä. (Laamanen, ym., 2022, s. 69.) Ilman vaihtumista voidaan tehostaa poistoilmahormilla, jonka kautta poistoilma kuljetetaan vesikaton yläpuolelle. Poistoilmahormi voi toimia koneellisesti tai luonnollisesti savupiippuvaikutuksen avulla. Kuvassa 19 on esitetty ilmankierto luonnollisesti tuulettamassa ryömintätilassa vasemmalla puolella ja poistoilmahormilla tehostetulla tuulettamisella oikealla puolella. (Siikainen, 2008, s. 221.)



Kuva 19. Tuuletus kylmässä ryömintätilassa (Siikainen, 2008, s. 220).

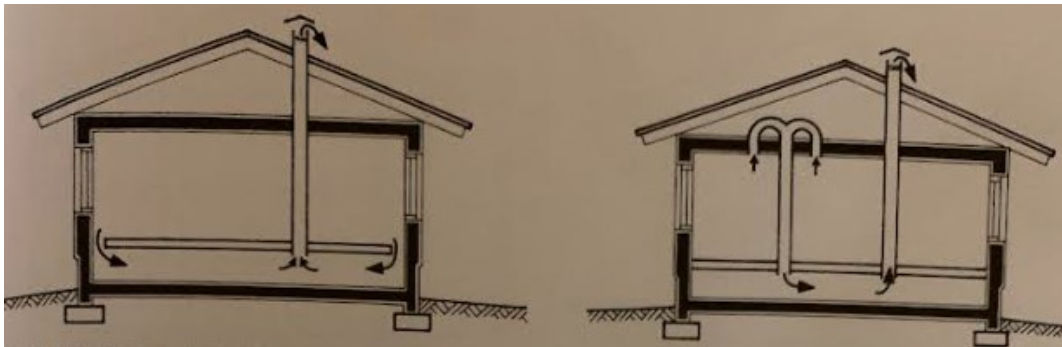
Lämmin alapohjarakenne toteutetaan eristämällä maanpinta ja perusmuuri. Tällöin lämmöneristys ja höyryn- ja ilmansulku on ryömintätilan alapuolella maanpinnalla. Lattiarakenne ei tällöin tarvitse lämmöneristettä. Ryömintätilaan tehdään huoltoon varten kulkuyhteys rakennuksen sisäpuolelta. Massiivipuurakenteinen tuulettuva alapohja suositellaan toteutettavaksi lämpimänä ja koneellisesti tuulettuna. Kuvassa 20 on periaatteellinen rakenneleikkaus lämpimästä koneellisesti tuulettuvasta massiivipuusta alapohjaratkaisusta. (Siikainen, 2008, s. 226; Puuinfo, 2020j) Rakennusfysikaalisesti lämpimän ryömintätilan eristys toimii samoin kuin muidenkin maanvastaisten rakenteiden. Kosteusteknisen toiminnan kannalta

lämpimän alapohjarakenteen selkein etu on ryömintätilan pysyminen kuivana, koska lämpöolosuhteet eivät vaihtele vuodenaikojen mukaan. (Siikainen, 2008, ss. 226-225; Vinha, ym., 2013, s. 209.)



Kuva 20. Lämmin tuulettuva massiivipuinen alapohja (Puuinfo, 2020j).

Ryömintätilan ilmanvaihto tehdään osaksi rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmää. Ilmanvaihdon toteuttamiseen on kaksi tapaa. (Siikainen, 2008, s. 227.) Kuvassa 21 on havainnollistettu näiden vaihtoehtoisten ilmastointijärjestelmien toimintaperiaatetta.



Kuva 21 Tuuletus lämpimässä ryömintätilassa (Siikainen, 2008, s. 227)

Käytännössä huonetilojen poistoilma johdetaan koneellisen ilmanvaihdon avulla ryömintätilaan ja vasta sieltä vesikaton yläpuolelle. Kuvassa 21 vasemmalla puolella huonetilan poistoilma on johdettu lattian reunojen kautta alapohjan ryömintätilaan. Oikeanpuolisessa kuvassa ilma siirretään ryömintätilaan yläpohjan kautta. Molempien järjestelmien toimivuus perustuu täysin koneelliseen ilmanvaihtoon, joten sen pitää olla toimintavarma. (Siikainen, 2008, s. 227.)

8 ESIMERKKIRAKENTEET

Rakenteiden kosteusteknisestä toimivuudesta on tehty paljon tutkimusta. Lisäksi rakennusten ja rakenteiden kosteuden hallinnan eri näkökulmista on paljon ohjekirjallisuutta. Näistä on löydettävissä useita erilaisia mallirakennetyyppejä, joiden kosteustekninen toimivuus on osoitettu simulaatioilla tai kokemukseen perustuen. Liitteessä 1 on AutoCad -ohjelmalla piirrettyjä esimerkkirakennetyyppejä, jotka on tehty kirjallisuudesta löytyneiden ohjeiden ja mallirakenteiden perusteella. Liitteessä on ovat seuraavat esimerkkirakennetyyppiinrustukset:

- US1 – rankarakenteinen ulkoseinä, puuverhoilu
- US2 – rankarakenteinen ulkoseinä, tiiliverhoilu, yli 10 m korkea seinä
- US3 – rankarakenteinen ulkoseinä, tiiliverhoilu, alle 10 m korkea seinä
- US4 – rankarakenteinen ulkoseinä, levyrappaus
- US5 – rankarakenteinen ulkoseinä, teräskasettiverhoilu
- US6 – massiivipuurunko, puuverhoilu
- US7 – massiivipuurunko, levyrappaus
- US8 – massiivipuurunko, teräskasettiverhoilu
- AP1 – maanvastainen alapohja
- AP2 – tuulettuva alapohja, rankarakenne, kylmä
- AP3 – tuulettuva alapohja, massiivipuurakenne, lämmin.

Liitteessä olevat rakennetyypit ovat esimerkkejä yleisesti toimivista rakenteista. Esimerkkirakenteet on kuitenkin aina varmistettava kohteeseen sopiviksi. Rakenteet täyttävät ympäristöministeriön lämmönläpäisykertoimien eli U-arvojen vertailuarvot ollen osittain niitä parempia. Esimerkkirakennetyyppejä ei ole tarkoituksella tehty normaalia paremmiksi eristäviksi. Puukerrostalo voidaan toteuttaa tässä työssä esitettyjä esimerkkirakenteita paremmilla lämmönläpäisykertoimien arvoilla. Näiden rakenteiden suunnitteluun löytyy ohjeita muun muassa lähteestä (Lahdensivu, ym., 2012). Suunnittelemalla rakenteen lämmönläpäisykertoimet vertailuarvoja paremmiksi voidaan pienentää rakennusten energian kulutusta, mikä vähentää osaltaan hiilidioksidipäästöjä.

Lämmönläpäisykertoimen parantaminen onnistuu lisäämällä rakenteen eristävyyttä. Käytännössä tämä tapahtuu eristekerrosta paksuntamalla. Rakenteisiin joutunut kosteus kuivuu pääasiassa diffuusion vaikutuksesta, koska höyryn- ja ilmansulkukerros vähentää merkittävästi pakotetun konvektion aiheuttamia ilmavirtoja. Paksussa rakenteessa kosteuden siirtyminen diffuusion avulla hidastuu ja hidastaa samalla rakenteen kuivumista. Tämä saattaa aiheuttaa rakenteen sisäosaan olosuhteet, jotka mahdollistavat kosteusvaurion syntymisen. Vaurioiden syntyminen lyhentää rakenteen käyttöikää, eikä rakennus toimi enää hiilinieluna. Lahoavasta puusta päinvastoin vapautuu hiilidioksidia. Liitteessä 1 olevat esimerkkirakenteet on tehty kirjallisuudesta löytyneiden ohjeiden pohjalta niin, että niissä olisi vähintään vertailuarvon mukainen U-arvo, mutta ne eivät ole tarpeettoman paksuja. Seuraavissa kappaleissa käsitellään, millä keinoin tavallisten puukerrostalon ulkoseinä- ja alapohjarakenteiden erityispiirteitä ja miten niiden kosteusteknistä toimintaa voitaisiin parantaa.

8.1 Ulkoseinät

Puurunkoisen kerrostalon julkisivu voidaan valita monesta erivaihtoehdosta. Liitteessä 1 olevissa rakennetyypeissä on esitetty joitakin näistä vaihtoehdoista. Ulkoverhoilun tulee olla kestävä ja helposti huollettavissa, koska erilaisen sääolot, kuten vesi- ja lumisateet, tuulisuus, ilmankosteus ja auringon säteily rasittavat ulkoverhoilua. Ilmastosta aiheutuvat rasitukset ovat eri suuruisia riippuen rakennuspaikasta ja julkisivujen suunnasta. Julkisivun valinta ei aina ole yksinkertainen ratkaisu. Puun käyttö julkisivumateriaalina vähentää rakentamisen hiilijalanjälkeä ja lisää rakennukseen sitoutuvan hiilidioksidin määrää. Lisäksi puinen julkisivu on kosteusteknisesti toimiva. Se vaatii kuitenkin suhteellisen usein toistuvan huoltomaalauksen pysyäkseen kunnossa. Puukerrostalon runko toimii kuitenkin pääasiallisena hiilinieluna, joten sen puolesta voidaan hyvin valita puukerrostaloon muitakin julkisivuvaihtoehtoja. Joissain tapauksissa puinen julkisivu ei ole edes sallittu ratkaisu. Palomääräyksien mukaan 3-6 -kerroksisessa asuinkerrostalossa voidaan käyttää puuta ulkoverhouksessa, mutta tätä korkeammissa rakennuksissa se ei enää ole

mahdollista. Rapattu kuitusementtilevy on palamaton, eikä se vaadi usein toistuvia huoltotoimenpiteitä. Teräsjulkisivu on myös kosteusteknisesti turvallinen ja lähes huoltovapaa ratkaisu. Teräksen korkea hinta ja sen valmistuksessa vapautuvat kasvihuonepäästöt tekevät siitä kuitenkin tällä hetkellä huonon vaihtoehdon. Teräksen valmistajat ovat heränneet ongelmaan ja siihen pyritään löytämään ratkaisuja esimerkiksi erilaisista valmistusmenetelmistä. Mikäli teräksen hinta tulevaisuudessa alenee ja valmistusmenetelmistä saadaan ympäristöystävällisempiä, teräs on erittäin hyvä, kestävä ja monipuolinen julkisivumateriaali.

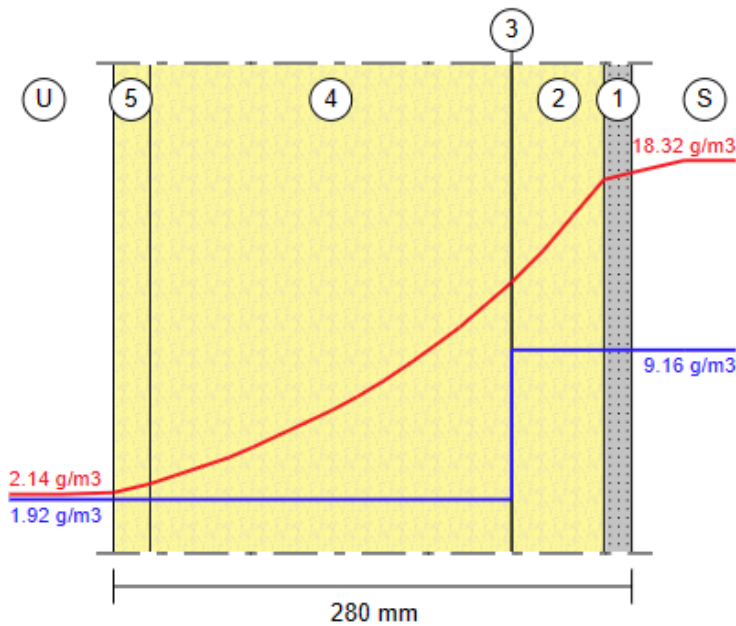
Ulkoseinien lämmönvastuksen vertailuarvon laskennassa tuulettuvaa julkisivurakennetta ei kuulu huomioida. Esimerkkirakenteissa on kaikissa tuulettuva julkisivu, joten rakennekerrokset huomioidaan vain tuulensuojalevyyn asti. Tuuletusvälin kasvattaminen parantaa kaikkien ulkoseinärakenteiden kosteusteknistä toimivuutta, koska se tehostaa rakenteeseen päässeen kosteuden kuivumista. Rakenteesta tulee näin toimintavarmempi. Pääosaan liitteen 1 ulkoseinärakennetyyppeihin on piirretty tuuletusväliksi 20 millimetriä, joka on minimivaatimus. Puujulkisivussa on poikkeuksellisesti 32 millimetrin tuuletusväli, joka on suositusta parempi. Tähän ratkaisuun päädyttiin, koska ulkoverhouslaudan kiinnittäminen vaatii vähintään ulkoverhouslaudan paksuisen koolauksen. Koolaukset on hyvä toteuttaa pystykoolauksella, jolloin tuuletus tapahtuu tehokkaasti koko seinän korkeudelta. Puuverhoilun kohdalla täytyy huomioida palomääräyksien asettamat vaatimukset, joiden mukaan tuuletusväli on katkaistava joka kerroksen kohdalla palokatolla. Tähän tarkoitukseen markkinoilta löytyy tuotteita, jotka mahdollistavat tuuletuksen. Tuuletusväliä voidaan kasvattaa ristikoolauksen avulla, jolloin ilman pääsee kiertämään julkisivun taakan myös sivusuunnassa.

8.1.1 Rankarunkoiset ulkoseinät

Rankarunkoisen ulkoseinän julkisivuna voi olla, mikä tahansa hyvin tuulettuva julkisivuverhoilu. Tämä rakennetyyppi on liitteessä 1 olevien US1-, US4- ja US5-rakennetyyppien taustalla. Näiden rakennetyyppien U-arvoksi saatiin

0,17 W/m²K. Samalla rakennetyypillä voidaan toteuttaa myös tiiliverhoilu, jossa on käytetty sadetakkipellitystä. Tämä on esitetty liitteen 1 rakennetyypissä US2. Rakennetyypissä US3 on kuvattuna alle 10 metriä korkea ilman sadetakkipeltiä toteutettu tiiliverhoiltu ulkoseinä. Se eroaa muista rankarunkoisista seinistä paksumman tuulensuojalevyn ja höyryn- ja ilmansulkukalvona toimivan hygrokalvon osalta. Paksumpi tuulensuojalevy parantaa rakenteen kokonaislämmönjohtavuutta, ja sen U-arvo on 0,14 W/m²K. Lämpötila- ja kosteusjakaumat ovat samankaltaiset kuin tavallisessa ulkoseinän rungossa. Ilman sadetakkipeltiä toteutettu tiiliverhoiltu ulkoseinä on erittäin haastava saada toimimaan kosteusteknisesti oikein, eikä sitä suositella ensisijaiseksi kerrostalon julkisivuratkaisuksi. Parempi ratkaisu tiilipintaisen julkisivun toteuttamiseen on ohuttiiliverhoilu, joka voidaan toteuttaa tuulettavana sementtipohjaisen rakennuslevyn päälle samaan tapaan kuin levyrappaus. Tällöin julkisivu on hyvin tuulettuva ja runkorakenne voidaan toteuttaa samanlaisena kuin muissakin tuulettuvissa rakenteissa.

Kuvassa 22 olevan lämpötilakuvaajan laskennassa käytetyt hetkelliset olosuhteet olivat: sisäilman lämpötila 21 °C ja ilmankosteus 50 prosenttia, sekä ulkoilman lämpötila -10 °C ja ilmankosteus 90 prosenttia. Tietyillä hetkellisillä lämpötila ja kosteusarvoilla tehdyt laskelmat antavat tietoa rakenteen hetkellisestä kosteusteknisestä toiminnasta. Todellisuudessa olosuhteet ovat jatkuvassa muutoksessa, mikä vaikuttaa myös rakenteen toimintaan. Rakenteen hetkellinen tarkastelu antaa viitteitä sen todellisesta toimivuudesta, mutta pidempi aikainen tarkastelu esimerkiksi simuloinnin avulla, antaa paremman käsityksen rakenteen todellisesta toiminnasta. Kosteusjakaumapiirroksista voidaan havaita, että rakennekerroksien lämpötilasta riippuvat kyllästyskosteuspitoisuuden ja todellisen kosteuspitoisuuden käyrät eivät leikkaa. Tämä tarkoittaa sitä, että rakenteessa ei tapahdu tiivistymistä laskennan olosuhteissa.



Kuva 22. Rankarunkoisen ulkoseinän lämpötilakuvaaja.

Ilman sadetakkipellitystä toteutettavan tiilijulkisivun taakse on lisättävä reilusti tavallista paksumpi eli noin 100 millimetrinen tuulensuojalevy, jotta päästään suositeltuun kokonaislämmönvastuksen arvoon $3,0 \text{ m}^2\text{K/W}$. Paksun tuulensuojalevyn tarkoituksena on pitää runkorakenne lämpimänä, jolloin kosteuden tiivistyminen runkoon muuttuu epätodennäköisemmäksi. Rankarakenteisen ulkoseinän kosteusteknistä toimivuutta voidaan yleisesti ottaen parantaa suurentamalla tuulensuojalevyn lämmönvastusta. Tuulensuojalevyn lämmönvastuksen parantaminen onnistuu paksummalla tuulensuojalevyä tai valitsemalla tuote, jossa on parempi lämmönvastuksen arvo. Tavallisen tuulettuvan julkisivun taakse suositellaan tuulensuojalevyä, jonka kokonaislämmönvastuksen arvo $0,5 \text{ m}^2\text{K/W}$. Tämä saavutetaan noin 20 millimetrin paksuisella tuulensuojalevyllä. Käytännössä markkinoilta löytyy helpommin 30 millimetriä paksuja tuulensuojalevyjä, joten esimerkkirakennetyypeissä on käytetty sellaista. Tuulensuojalevy voidaan vaihtaa 50 millimetriseen levyyn, jolloin seinän kosteustekninen toimintaa parantuu, mutta rakenteesta ei tule liian paksu.

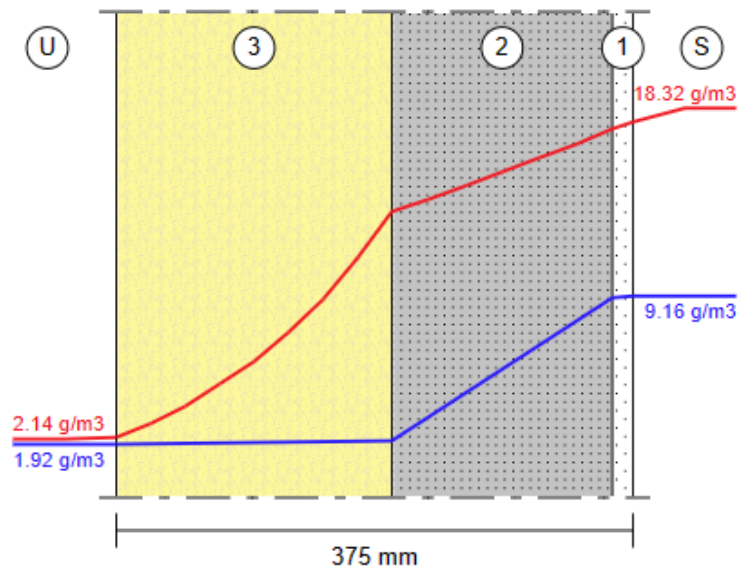
Eristeen lisääminen höyryn- ja ilmansulkukerroksen ulkopuolelle on kosteusteknisesti turvallisempaa kuin sisäpuolinen eristäminen. Sisäpuolelle lisätty eristekerros viilentää runkorakennetta, jolloin kosteus tiivistyy helpommin ja saattaa aiheuttaa runkoon vaurioita. Höyryn- ja ilmasulun sisäpuolella saa olla

maksimissaan 25 prosenttia eristeestä. Normaalissa rakenteessa tämä tarkoittaa maksimissaan 50 millimetrin paksuista eristekerrosta. Rankarunkoisissa esimerkkirakenteissa on höyryn- ja ilmansulkukerroksen sisäpuolelle laitettu 50 millimetriä paksu eristekerros. Vaikka tämä sisäpuolinen eristekerros josain määrin heikentää rakenteen kosteusteknistä toimintaa, sillä saadaan rakenteesta energiatehokkaampi. Lisäksi sisäpuolinen eristekerros mahdollistaa höyryn- ja ilmansulkukerroksen sisäpuolelle asennustilan. Asennustila helpottaa esimerkiksi sähköasennuksien tekoa, niin että höyryn- ja kosteudensulkukerros ei rikkoudu. Samalla vähenee todennäköisyys sille, että rakennuksen käyttäjä rikkoo höyryn- ja ilmansulkukerroksen omalla toiminnallaan esimerkiksi taulujen ripustamisen yhteydessä. Höyryn- ja ilmansulkukerroksen on erittäin tärkeää pysyä ehjänä, jotta pakotetun konvektion aiheuttamien ilmavirtojen mukana ei pääse sisäilman kosteutta rakenteen sisään. Sisäpuolisen eristyskerroksen ansiosta rakennuksen käytönaiheuttamat häiriötilanteet vähenevät, eikä normaalille kosteustekniselle toiminnalle aiheudu liikaa haittaa.

8.1.2 Massiivipuurunkoiset ulkoseinät

Liitteessä 1 olevien US7-, US8- ja US9-rakennetyyppien runkona on CLT-massiivipuulevy. Massiivipuurunkoisen ulkoseinän rakenteessa on vähemmän ainekerrosten välisiä rajapintoja, joihin kosteus voi tiivistyä. Massiivipuinen rakennus on ehdottomasti eristettävä ulkopuolelta, jolloin puurunko pysyy lämpimänä ja kuivana. Massiivipuu-ulkoseinä on mahdollista eristää kahdella tavalla: yksinkertaisesti yhdellä paksulla kerroksella jäykkää mineraalivillakerrosta tai pehmeällä mineraalivillalla ja erillisellä tuulensuojalevyllä. Tämä vaihtoehto kuitenkin vaatisi koolauksen pehmeään mineraalivillakerrokseen. Koolauksesta aiheutuisi rakenteeseen kylmäsiltoja, joten samaan eristystulokseen pääsemiseksi tarvittaisiin isompi kerros eristettä. Tämän vuoksi liitteen 1 esimerkkirakennetyyppiin on valittu jäykällä mineraalivillakerroksella eristetty CLT-massiivipuurakenne. Kosteusteknisen toiminnan kannalta jäykän mineraalivillan vaatimukset ovat samat kuin rankarunkoisellakin seinällä. Tuuletusvälin takana olevan materiaalin ominaislämpökapasiteetin ja homeutumisherkkyysluokan pitää olla riittävän hyvä. Homeutumisherkkyysluokan tulee olla

vähintään HHL2. Kuvassa 23 on CLT-massiivipuulevystä tehdyn seinän runkorakenteen lämpötilakuvaaja. Ulkoseinän U-arvo on $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$. Laskennassa käytetyt hetkelliset olosuhteet ovat samat kuin rankarunkoisella rakenteella. Kosteusjakaumapiirroksista voidaan havaita, ettei rakenteessa tapahdu tiivistymistä, koska rakenteen kosteus- ja kyllästyskosteuskäyrät eivät risteä.



Kuva 23. CLT-massiivipuulevyrunkoisen ulkoseinän lämpötilakuvaaja.

Massiivipuurakenne toimii itsessään höyrynsulkuna. Se ei tee kuitenkaan rakenteesta täysin tiivistä, koska puu on hygroskooppinen materiaali. Hygroskooppisuus tasaa sisäilman kosteuden vaihteluita ja tekee näin rakennuksen käyttäjille miellyttäväksi. Hygroskooppisuudesta on etua myös rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta. CLT-levyjen saumat on muistettava tiivistää huolellisesti niin, että höyrynsulkukerros kattaa koko rakennuksen. Ulkoseinärakenteeseen on lisättävä erillinen ilmansulkukalvo, mikäli käytetään yhtä mineraalivillakerrosta. Markkinoilta löytyy jäykkiä mineraalivilla levyjä, joihin on valmiiksi kiinnitetty ulkopintaan tarvittava ilmansulkukalvo. Mikäli käytetään erillistä tuulensuojalevyä, sen saumat on limitettävä eri paikkoihin kuin lämmöneristeen saumat. Tämän avulla saavutetaan vastaava tuulensuoja kuin erillisellä ilmansulkukalvolla. Massiivipuurakenteessa saavutetaan pienemällä eristepaksuudella yhtä hyvä U-arvo kuin rankarunkoisessa ulkoseinässä. Tämä johtuu siitä, että massiivipuulevyn ominaisuuksiin kuuluu myös

lämmöneristävyys. Rakenteen lämmöneristävyyttä parantaa lisäksi se, ettei runkorakenteesta synny eristeeseen kylmäsiltoja, kuten rankarakenteisissa seinissä tapahtuu.

Massiivipuurunkoinen rakennus voidaan ulkoverhoilla samoin kuin rankarunkoinenkin. Käytännössä tiiliverhoilua, jossa ei ole taustalla sadetakkipeltiä, ei voida käyttää. Massiivipuurunkoinen kerrostalo on taloudellisesti järkevää toteuttaa mahdollisimman korkeana. Näin ollen mataliin seiiniin tarkoitettu julkisivuverhoilu ei ole vaihtoehto CLT-runkoiseen rakennukseen. Sadetakkipellitksen avulla tehty tiiliverhoilu on mahdollista toteuttaa, mutta järkevämpää on toteuttaa se kuten rankarunkoisessakin talossa ohuttiiliverhoilua sementtipohjaisen rakennuslevyn päälle. Liitteen 1 esimerkkirakennetyyppeihin ei ole piirretty tiiliverhoiltua CLT-ulkoseinää, koska se ei ole todennäköinen julkisivuvaihtoehto korkeaan kerrostaloon.

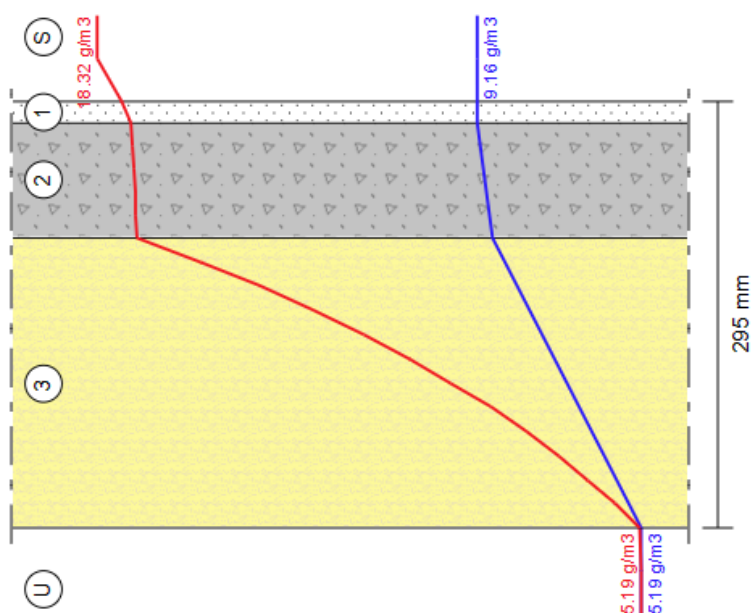
8.2 Alapohjat

Liitteessä 1 on esitetty kolme erilaista alapohjaratkaisua. Nämä ovat maanvainen alapohja, sekä kylmä ja lämmin tuulettuva alapohja eli rakennetyypit AP1, AP2 ja AP3. Kaikki vaihtoehdot ovat puukerrostaloon sopivia ratkaisuja. Sopivan alapohjaratkaisun valinnassa on huomioitava muun muassa maaperän kosteuden tuotto. Mikäli maaperä on todella kostea, puurakenteisen tuulettuvan alapohjan teko kosteusteknisesti toimivaksi on erittäin vaikeaa jo nykyisessä ilmastossa. Ympäristön kannalta on silloin järkevintä toteuttaa puukerrostalon alapohja maanvastaisena teräsbetonilaattana, vaikka betonin valmistus tuottaakin hiilidioksidipäästöjä. Toimivalla alapohjalla voidaan varmistaa rakennukselle pitkä käyttöikä. Seuraavissa kappaleissa on kerrottu näiden alapohjarakenteiden kosteusteknisen toiminnan erityispiirteistä ja miten niistä voi tehdä toimivampia tulevaisuuden ilmastossa. Rakenteiden hetkellisessä kosteusteknisessä tarkastelussa on käytetty samoja sisäilman lämpötila- ja kosteuspitoisuuksia kuin ulkoseinien tarkastelussa eli 21 °C ja ilman kosteus 50 prosenttia. Ulkopuolen olosuhteet poikkeavat ulkoseinien tarkasteluolosuhteista, koska maaperän kosteuspitoisuuden voidaan katsoa olevan aina 100

prosenttia ja lämpötila voidaan olettaa ulkoilmaa lämpimämmäksi. Rakennus lämmitetään aina alapuolellaan olevaa maaperää. Erityisesti tämä voidaan havaita laajojen rakennusten alapohjien keskialueilla ja niissä kohdissa, joissa on lattialämmitys. Nämä seikat on huomioitava myös alapohjan kosteusteknistä toimintaa suunniteltaessa esimerkiksi lisäämällä reuna-alueiden eristystä.

8.2.1 Maanvastainen alapohja

Rakennetyypissä AP1 on piirretty maanvarainen alapohja, jonka U-arvoksi saatiin $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$. U-arvon laskemisessa ei huomioida eristekerroksen alapuolella olevaa kapillaarikatkosorakerrosta, vaikka sillä todellisuudessa saataisi olla lämpöä eristäviä ominaisuuksia. Kuvassa 24 on havainnollistettu rakenteen kosteusjakauma. Siitä voidaan havaita, että rakennekerroksien kosteus ja kyllästymiskosteuskuvaajat risteävät eristekerroksen alapuolella. Tämä johtuu maaperän kosteuspitoisuudesta, eikä sillä käytännössä ole merkitystä rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta. Kapillaarisesti tapahtuva kosteuden nousu ylöspäin rakenteessa on kuitenkin estettävä. Käytännössä EPS-eriste on muovia, joka ei mahdollista kosteuden kapillaarista nousua. Mahdollinen homekasvusto EPS-eristeen alapuolella ei vaikuta rakenteen toimintaan, eikä siitä aiheudu haittaa rakennuksen terveysturvallisuudelle.

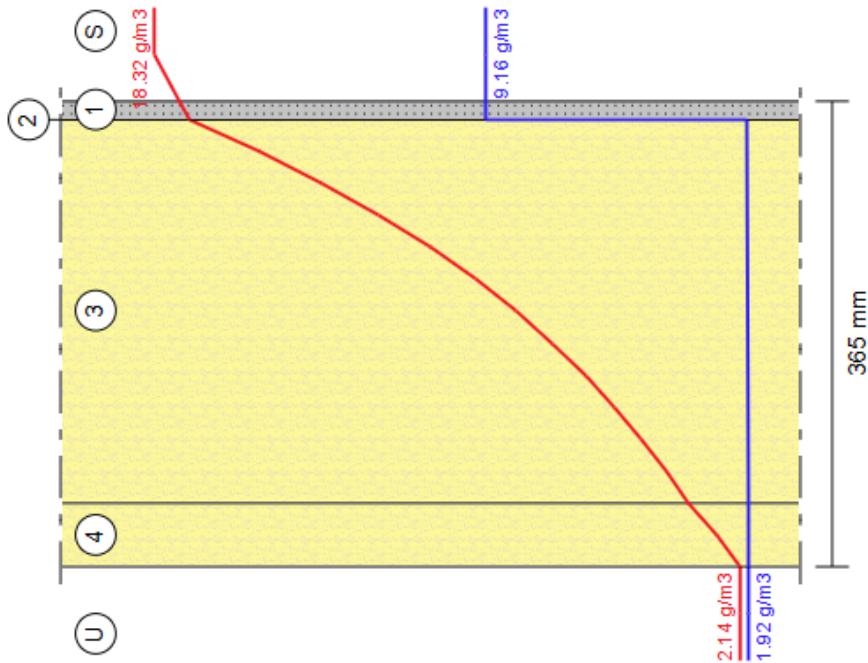


Kuva 24. Maanvastaisen alapohjan lämpötilakuvaaja.

Maanvarainen alapohjarakenne ei ole puinen rakenne, mutta siitä huolimatta se on puukerrostaloissa yleinen ja kosteusteknisesti hyvin toimiva rakenne. Sen avulla voidaan varmistaa puukerrostalolle pitkä käyttöikä. Sen vuoksi se on valittu yhdeksi esimerkkirakenteeksi. Maanvaraisen alapohjan erityisyytenä muihin rakennetyyppeihin nähden on se, että eristeen lisäys ei huononna sen kosteusteknistä toimintaa. Käytännössä eristeen lisäys parantaa kuitenkin rakenteen kokonaislämmönvastusta tietyn pisteen jälkeen hyvin vähän. Näin ollen hyvin eristetyn alapohjan lisäeristäminen ei ole taloudellisesti, eikä ympäristön kannalta järkevää, koska sen avulla saavutettu energiansäästö ei ole riittävän suuri. Betonilaatta on massiivirakenne, joten maanvaraisen alapohjan tiivistäminen ei vaadi erillistä höyryn- ja ilmansulkukerrosta. Alapohjan ja ulkoseinien väliset liitoskohdat on kuitenkin aina tiivistettävä huolellisesti.

8.2.2 Tuulettuvat alapohjat

Liitteen 1 rakennetyypeissä AP2 ja AP3 on piirrettynä kaksi erityyppistä tuulettuvaa ryömintätilaista alapohjaa. Rakennetyypissä AP2 on kuvattuna ulkoilmaan tuulettuva alapohja ja rakennetyypissä AP3 on koneellisesti tuuletettu lämmin alapohja. Molempien alapohjien U-arvoksi saatiin $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$. Kuvassa 27 on kylmän ulkoilmaan tuulettuvan alapohjan runkorakenteen kosteus- ja lämpötilakuvaajat. Laskelmat on tehty samoilla sisäilman lämpötila- ja kosteusarvoilla kuin edelliset laskelmat. Ulkolämpötilana eli ryömintätilan lämpötilana on käytetty -10 °C :ta ja ilmakeuhutena 90 prosenttia. Näissä olosuhteissa kosteus ei tiivisty alapohjan runkorakenteeseen, kuten kuvan 25 kosteuskuvaajasta voidaan havaita.



Kuva 25. Ulkoilmaan tuulettuvan alapohjan runkorakenteen lämpötilakuvaaja.

Ulkoilmaan tuulettuvan alapohjan kosteusteknisen toiminnan varmistaminen perustuu pitkälti ryömintätilan mahdollisimman alhaiseen kosteuspitoisuuteen. Mikäli ilmankosteus nousee ryömintätalassa 100 prosenttiin, kosteus tiivistyy alapohjarakenteeseen. Keväisin, kun ulkoilma lämpenee, mutta ryömintätalassa ilma on viileämpää talven jäljiltä, ilman kosteus pitoisuus nousee helposti 100 prosenttiin ryömintätalassa. Tämän vuoksi alapohja tulee suojata vähäisesti homeutumisherkällä tuulensuojalevyllä, jotta se kestää hetkittäisen kostumisen vaurioitumatta ja suojaa puurunkoa kosteudelta. Ryömintätilaan nousee kosteutta myös maasta. Tätä on pyrittävä vähentämään maaperän kallistuksilla, salaojituksella ja kapillaarikatkolla. Mikäli maaperän kosteuden tuotto on suuri, sen pääsyä ryömintätilaan voidaan vähentää laittamalla kapillaarikatkosoran päälle muovi. Muovin alapintaan kertyy tällöin kosteutta. Tällä ei ole merkitystä rakennuksen terveysturvallisuuteen, mikäli alapohjan tiivistys on tehty asian mukaisesti. Maanpinnalle kapillaarikatkosoran päälle on laitettava eriste tasoitaa vuoden aikojen vaihtelun aiheuttamia muutoksia maanlämpötilassa ja siten myös ryömintätalassa. Maanpinnan päälle tuleva eristys voidaan toteuttaa kevytsoralla tai EPS-levyllä. EPS-levy toimii muovina maan pinnalla. Maanpinnan eristeen valinnassa on pohdittava minkä tyyppisellä eristeellä saavutetaan mahdollisimman vähäinen kosteuden tiivistyminen ja tasaisimmat olosuhteet ryömintätilaan.

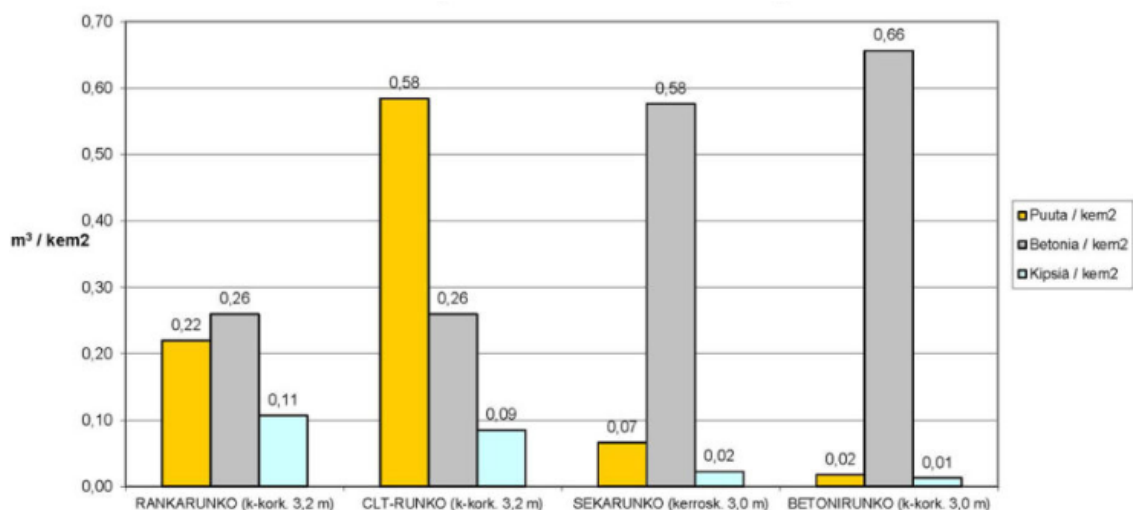
Puukerrostalon alapohja voidaan toteuttaa ulkoilmaan tuulettavana, mutta paremmin toimiva vaihtoehto on toteuttaa ryömintätila lämpimänä ja sisäpuolelta koneellisesti tuulettavana. Tällainen rakenne on esitetty liitteen 1 rakennetyypissä AP3. Rakenteen U-arvo on $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$. Rakennetyypissä runkorakenne on CLT-massiivilevyinen, mutta rankarunkoinen alapohja voidaan toteuttaa vastaavasti lämpimällä ryömintätilalla. Lämmin ryömintätila on eristetty samoin kuin maanvastainen alapohja ja sen kosteustekninen toiminta on käytännössä samankaltainen kuin maanvastaisessa alapohjassa. Runkorakenteeseen ei tarvitse lisätä eristettä, koska eristys on kokonaan maanpinnalla. Sisäpuolelta tuulettuvan alapohjan heikkoutena voidaan pitää tuuletuksen perustamista koneelliseen ilmanvaihtoon. Tämä vaatii alapohjan ilmanvaihdolta toimintavarmuutta, jota on seurattava säännöllisesti. Toisaalta kaikkien ryömintätilaisten alapohjien toimintaa on säännöllisesti seurattava, joten suurta eroa vaihtoehtojen välillä ei tässä suhteessa ole. Kosteusteknisesti lämmin tuulettuva alapohja on kuitenkin toimintavarmempi kuin kylmä ulkoilmaan tuulettuva alapohja.

9 POHDINTA

Ilmastonmuutos vaikuttaa monin tavoin vaipparakenteiden toimintaan. Puurakenteet ovat erityisen herkkiä ilmastonmuutoksen vaikutuksille. Niillä on kuitenkin tärkeä rooli pyrittäessä hiilineutraaliuteen vuoteen 2035 mennessä. Puun ominaisuus varastoida itseensä ilman hiilidioksidia tekee siitä tehdyistä rakennuksista hiilinieluja. Tämän ominaisuuden vuoksi puuta pitäisi suosia rakentamisessa entistä enemmän. Samalla on pystyttävä varmistamaan, että puurakenteet säilyvät pitkään kestävinä, terveinä ja turvallisina. Rakenteiden on pysyttävä kaikissa ilmasto-olosuhteissa riittävän kuivina. Kosteus yksinään ei aiheuta ongelmia, vaan rakenteen kuivumisen estyminen esimerkiksi suunnittelu- tai rakennusvirheen vuoksi. Jos kuivumista ei pääse tapahtumaan ja rakenne pysyy lisäksi riittävän lämpimänä, rakenteeseen alkaa syntyä kosteusvaurioita, kuten homeita, lahoa ja muita mikrobikasvustoja.

Puurakenteiden vaurioituminen on pyrittävä estämään rakennushankkeen kaikissa vaiheissa, ja rakennetyyppien suunnittelu on tärkeä osa tätä kokonaisuutta. Rakenteiden rakennusfysikaalisen toiminnan varmistaminen tekee puurakennuksista pitkäikäisiä. Tästä hyötyvät käyttäjät, mutta myös ilmasto ja ympäristö, puurakenteiden pysyessä pitkään hiilinieluinä. Pitkä käyttöikä asettaa suunnittelulle haasteita myös siltä osin, että rakennuksen käyttötarkoituksen tulisi olla helposti muunneltavissa. Tähän ominaisuuteen vaikuttaa erityisesti runkoratkaisu. Pilari-palkki rakenteiset kerrostalot ovat muita vaihtoehtoja helpommin muunneltavissa, mutta järkevästi suunniteltuina muistakin runkoratkaisuista saadaan muunneltavia.

Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi ja hiilinielujen kasvattamiseksi puuta pitäisi saada rakennukseen mahdollisimman paljon. Puupohjaiset eristeet olisivat hyvä vaihtoehto suurentaa puukerrostalon hiilinielua. Niitä ei kuitenkaan voi käyttää puukerrostaloissa liian heikon paloluokituksen vuoksi. Puukerrostalon runko voidaan rakentaa erilaisilla tavoilla. Näihin menee kaikkiin eri määrä puuta. Kuvasta 26 nähdään, että selkeästi eniten puuta käytetään CLT-massiivilevyrunkoisessa kerrostalossa. Puurankarunkoisessa talossa puuta on käytetty selkeästi vähemmän, mutta kuitenkin enemmän kuin sekarunkoisessa kerrostalossa.



Kuva 26. Materiaalimenekit 6-kerroksisessa asuinkerrostalossa (Puuinfo, 2020k)

Tämän kuvaajan mukaan voitaisiin yksinkertaisesti sanoa, että CLT-massiivipuulevyistä tehty puukerrostalo on ympäristön kannalta paras vaihtoehto, koska niiden avulla kerrostalosta saadaan mahdollisimman suuri hiilinielu. Ihan näin yksinkertaiseen ajatteluun ei kuitenkaan kannata tyytyä, koska CLT-massiivilevyt ovat suhteellisen kalliita ja niiden hinta muodostuu kilpailukykyiseksi muihin vaihtoehtoihin verrattuna vasta, kun kerrosmäärät kasvavat riittävän isoiksi. Rankarunkoinen kerrostalo on tällöin myös hyvä vaihtoehto hiilinielun lisäämiseen, kun sitä verrataan tavalliseen betonikerrostaloon, jossa puuta on käytetty hyvin vähän. Betonin ja puun yhdistäminen runkoratkaisussa mahdollistaa myös suuremmat jännevälit kuin pelkkä puurunko, jolloin kerrostalon myöhempi käyttötarkoituksen muuttaminen saattaa olla helpompaa. Tämä vähentää uudisrakentamisen tarvetta, mikä säästää myös ympäristöä ja vähentää hiilidioksidipäästöjä. Tällöin sekarunkoinen kerrostalo voidaan myös nähdä järkevänä vaihtoehtona ja samalla voidaan hieman lisätä puun käyttöä rakentamisessa.

10 YHTEENVETO

Valtioneuvosto on kirjannut tavoitteeksi, että Suomi on hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi tarvitaan toimia kaikilla aloilla. Puurakentamisen lisääminen on kirjattu yhdeksi tavoitteeksi, jolla pyritään saavuttamaan hiilineutraalius. Ilmastonmuutoksen myötä ilmasto muuttuu entistä kosteammaksi. Viistosateet lisääntyvät ja kosteat välikausijaksot pitenevät. Tämä lisää puurakenteisiin kohdistuvia rasituksia. Opinnäytetyössä tutkittiin, miten puukerrostalon alapohja ja ulkoseinä rakenteiden kosteusteknistätoiminta voitaisiin varmistaa tulevaisuuden ilmastossa. Tutkimusmenetelmänä käytettiin kuvailevaa kirjallisuuskatsausta. Aiheesta löydettiin paljon tutkimusta ja ohjeistusta.

Tutkimuksessa selvitettiin, millaisia puukerrostaloja Suomessa on tähän mennessä rakennettu. Perehdyttiin niiden tyypillisiin runkorakenteisiin ja

insinööripuutuotteisiin, joilla puukerrostalot yleensä toteutetaan. Puukerrostaloissa palomääräyksien osalta selvitettiin, miten ne vaikuttavat rakenteissa käytettäviin materiaaleihin. Eristeenä voidaan käyttää vain mineraalivillaa, koska se on palamatonta. Ulkoseinärakenteiden kosteusteknistä toimintaa selvitettiin neljällä erilaisella julkisivuverhoilu vaihtoehdolla. Nämä olivat maalattu puuverhoilu, tiiliverhoilu, levyrapattu ja metalliverhoiltu julkisivu. Tiiliverhoiltu julkisivu todettiin erittäin haastavaksi rakenteeksi tulevaisuuden ilmastossa. Alapohjarakenteista selvitettiin maanvastaisen alapohjan ja tuulettuvan ryömintätilaisen alapohjan kosteusteknisiä ominaisuuksia. Ulkoilmaan tuulettuvan alapohjan todettiin olevan erityisesti keväisin haastava rakenne. Siitä on kuitenkin mahdollista tehdä toimiva, mikäli maaperän kosteuden tuotto ei ole liian suurta. Paremmaksi ratkaisuksi todettiin sisäpuolelta koneellisesti tuulettuva lämmin alapohjarakenne. Rakenteiden kosteusteknistä toimintaa havainnollistettiin DOF-lämpö -ohjelmalla piirrettyjen kosteuspitoisuuskuvaajien avulla.

Opinnäytetyön lopputuloksena tuotettiin AutoCad -ohjelmistolla esimerkkirakennetyyppejä. Nämä rakennetyypit on tehty kirjallisuudesta löytyneiden ohjeiden ja aiempien tutkimustulosten avulla. Tilaaja pystyy soveltamaan näitä rakennetyyppejä todelliseen kerrostalokohteeseen. Tämä vaatii rakennetyyppien kosteusteknisen toiminnan tarkempaa tutkimusta. Sovelletut rakennetyypit pitää osoittaa toimiviksi kosteusteknisten laskelmien tai simulointien avulla. Opinnäytetyö opettaa puukerrostalon tavallisten ulkoseinä ja alapohjarakenteiden ominaisuuksia, rakennetta ja kosteusteknistä toimintaa. Lisätutkimusta tarvitaan opinnäytetyön ulkopuolelle rajattujen vaipparakenteiden ja erityisesti niiden liitosten osalta.

LÄHTEET

CrossLam Kuhmo Oy. (n.d.). Crosslam CLT, Materiaalin ominaisuudet, tekniset tiedot ja rakentaminen. Haettu 17.1.2023 osoitteesta <https://crosslam.fi/crosslam-clt/>

D.O.F tech Oy. (2003). DOF-Lämpö versio 2.2 - käyttöohje. Haettu 19.3.2023 osoitteesta <https://www.dof.fi/www/files/DOF-lampo.pdf>

EPS-rakennuseristeteollisuus. (2022). Lattian eristys. Haettu 6.2.2023 osoitteesta <https://www.epseriste.fi/lattian-eristys/>

Huttunen, R.;Kuuva, P.;Kinnunen, M.;Lemström, B.;& Hirvonen, P. (2022). Hiilineutraali Suomi 2035: Kansallinen ilmasto- ja energiastrategia. Työ- ja elinkeinoministeriö. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-811-0>

Insinööritoimisto Lahtela Oy. (2021). Paloturvallinen puutalo, Asuin- ja toimittalarakentaminen. Puuinfo. https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2021/05/Palokirja_nettil_kokonainen.pdf

ISOVER. (2023). Laskurit. Haettu 20.3.2023 osoitteesta <https://www.isover.fi/laskurit#valintataulukko>

Jyväskylän yliopisto. (2021). Laadullinen tutkimus. Haettu 10.1.2023 osoitteesta <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/tutkimusstrategiat/laadullinen-tutkimus>

Karjalainen, M. (2019). Tutkimus suomalaisten asuinkerrostalojen runkoratkaisuista ja asuntojen omistusmuodoista. Puu 1/2019, 60-62. Haettu 12.1.2023 osoitteesta <https://proofer.faktor.fi/epaper/Puu119/#60>

Karjalainen, M. (21. 10 2022). Puukerrostaloja puskemassa lähes 30 vuotta. Haettu 12.1.2023 osoitteesta <https://puuinfo.fi/2022/10/21/puukerrostaloja-puskemassa-lahes-30-vuotta/>

Knauf. (n.d.-a). Aquapanel, outdoor, julkisivujärjestelmä. Haettu 25.1.2023 osoitteesta https://knauf.fi/fileadmin/user_upload/esitteet/Aquapanel_Outdoor3.pdf

Knauf. (n.d.-b). Aquapanel Outdoor, asennusohje. Haettu 25.1.2023 osoitteesta https://knauf.fi/fileadmin/user_upload/asennusohjeet/aquapanel/aquapanel_outdoor.png

Kunnela, A. (2022). Kirjallisuuskatsaukset. Jyväskylän yliopisto. Haettu 17.11.2022 osoitteesta <https://oppimaterialit.jamk.fi/yamk-kasikirja/kirjallisuuskatsaukset>

Laamanen, P.;Heimonen, I.;Mutanen, T.;Rajala, L.;Souto, A.;Turunen, T.;& Vinha, J. (2022). RIL 107-2022, Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

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. Noudettu osoitteesta <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-2951-1>

Laukkarinen, A., Jokela, T., Vinha, J., Pakkala, T., Lahdensivu, J., Lestinen, S., Jokisalo, J., Kosonen, R., Lindfors, A., Ruosteenoja, K., Jylhä, K. (2022). Vaipparakenteiden rakennusfysikaalisen toimivuuden ja huonetilojen kesäaikaisen jäähdytystehontarpeen mitoitusolosuhteet: RAMI-hankkeen loppuraportti. Tampereen yliopisto. Noudettu osoitteesta <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-03-2438-4>

Maankäyttö- ja rakennuslaki 1999/132. Haettu 9.1.2023 osoitteesta <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132>

Metsä Wood. (2021). Moisture behaviour, Kerto LVL. Haettu 19.1.2023 osoitteesta <https://www.metsagroup.com/globalassets/metsa-wood/attachments/kerto-lvl-manual/en/kerto-manual-lvl-moisture-behaviour.pdf>

Pitkäranta, M. (2016). Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Ympäristöministeriö. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-4626-8>

Puuinfo. (2020a). Rakenteet, Puukerrostalot, Suunnittelu. Haettu 11.1.2023 osoitteesta <https://puuinfo.fi/rakenteet/yhdistelmarakenteet/suunnittelu/>

Puuinfo. (2020b). Rakenteet, puukerrostalot, runkojärjestelmät. Haettu 11.1.2023 osoitteesta <https://puuinfo.fi/rakenteet/yhdistelmarakenteet/puukerrostalon-runkojarjestelmat/>

Puuinfo. (2020c). Suunnittelu, ohjeet, RunkoPES 2.0. Haettu 13.3.2023 osoitteesta <https://puuinfo.fi/suunnittelu/ohjeet/runkopes-2-0/>

Puuinfo. (2020d). Puutieto, Puun käyttö- ja rakentamisessa, Yleisimmät rakennejärjestelmät. Haettu 15.2.2023 osoitteesta <https://puuinfo.fi/puutieto/kaytkohteet/yleisimmat-rakennejarjestelmat/>

Puuinfo. (2020e). Puutieto, Insinööripuutuotteet. Haettu 15.2.2023 osoitteesta <https://puuinfo.fi/puutieto/insinoorituotteet/>

Puuinfo. (2020f). CLT by Stora Enso (Cross-laminated timber). Haettu 11.1.2023 osoitteesta <https://puuinfo.fi/tuotteet/insinooripuutuotteet/clt/clt-by-stora-enso-cross-laminated-timber/>

Puuinfo. (2020g). Puutieto, Puun ominaisuudet, Kosteustekniset ominaisuudet. Haettu 11.1.2023 osoitteesta <https://puuinfo.fi/puutieto/puun-ominaisuuksia/puun-kosteustekniset-ominaisuudet/>

Puuinfo. (2020h). Puutieto, Insinööripuutuotteet, Viilupuu (LVL). Haettu 11.1.2023 osoitteesta <https://puuinfo.fi/puutieto/insinoorituotteet/viilupuu-lvl/>

- Puuinfo. (2020i). Puutieto, Insinööripuutuotteet, Liimapuu. Haettu 11.1.2023 osoitteesta <https://puuinfo.fi/puutieto/insinoorituotteet/liimapuu-glt/>
- Puuinfo. (2020j). Rakenteet, Massiivipuulevyrakenteet, Rakennusosissa huomioitavia pääasiallisia seikkoja. Haettu 7.2.2023 osoitteesta <https://puuinfo.fi/rakenteet/massiivipuulevyrakenteet/rakennusosissa-huomioitavia-paaasiallisia-seikkoja/>
- Puuinfo. (2020k). Paljonko puukerrostalossa on puuta? Haettu 26.2.2023 osoitteesta <https://puuinfo.fi/rakenteet/yhdistelmarakenteet/paljonko-puukerrostalossa-on-puuta/>
- Puuinfo. (2021). Puurakenteen U-arvon määrittäminen. Haettu 27.2.2023 osoitteesta <https://puuinfo.fi/suunnittelu/mitoitustyokalu/puurakenteen-u-arvon-maarittaminen/>
- Puuinfo. (2022). Paloturvallisuus. Haettu 27.2.2023 osoitteesta <https://puuinfo.fi/paloturvallisuus/>
- Puuinfo. (2023). Puutieto, Insinööripuutuotteet, Monikerroslevy (CLT). Haettu 27.2.2023 osoitteesta <https://puuinfo.fi/puutieto/insinoorituotteet/monikerroslevy-clt/>
- Puuinfo. (n.d.). Kestävät puujulkisivut. Haettu 28.3.2023 osoitteesta <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/Kest%C3%A4v%C3%A4t-puujulkisivut.pdf>
- Raivio, T., Laine, A., Klimscheffskij, M., Heino, A., Lehtomäki, J. (2020). Rakennusteollisuuden ja rakennetun ympäristön vähähiilisyden tiekartta 2020-2035-2050. Gaia Consulting Oy: Rakennusteollisuus. https://www.rt.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahiilisyys_uudet/rt_4.-raportti_vahahiilisyden-tiekartta_lopullinen-versio_clean.pdf
- Rakentamisen Laatu RALA ry. (n.d.). Kuivaketju10. Haettu 31.1.2023 osoitteesta <http://kuivaketju10.fi/#etusivu>
- Riipola, K., Fonselius, M., Karlsson, R., Myllylä, P. (2014). Liimapuukäsikirja osa 1. Suomen Liimapuuyhdistys ja Puuinfo Oy. <https://www.liimapuu.fi/7>
- RT 103169. (2019). Ilmasto: Perustietoa suunnittelijalle. Rakennustieto. <https://kortistot.rakennustieto.fi>
- RT 103170. (2020). Ilmastonmuutos: Hillintä ja sopeutuminen rakennetussa ympäristössä. Rakennustieto. <https://kortistot.rakennustieto.fi>
- RT 103282. (2020). Tiilirakenteet. Rakennustieto. <https://kortistot.rakennustieto.fi>
- RT 82-10429. (1990). Metallikasetit julkisivussa. Rakennustieto. <https://kortistot.rakennustieto.fi>

RT 82-10829. (2004). Puujulkisivut. Rakennustieto. <https://kortistot.rakennustieto.fi>

Ruukki. (n.d.). Julkisivumateriaalit. Haettu 26.1.2023 osoitteesta <https://www.ruukki.com/fin/building-envelopes/products/facade-claddings/facade-cladding-materials?TabfiltersB2B=1tabfilter>

Scribbr. (n.d.). Miten kirjallisuuskatsaus tehdään? Haettu 17.11.2022 osoitteesta <https://www.scribbr.fi/opinnaytetyon-rakenne/kirjallisuuskatsaus-opinnaytetyo/>

Siikainen, U. (2001). Rakennusaineoppi. Rakennustieto.

Siikainen, U. (2008). Puurakentaminen. Rakennustieto.

Siikainen, U. (2014). Rakennusfysiikka, Perusteet ja sovelluksia. Rakennustieto.

Sitowise Oy. (n.d.). The Smart City Company. Haettu 21.3.2023 osoitteesta <https://www.sitowise.com/fi/smart-city-company>

Tampereen yliopisto. (n.d.). Suomalainen homemalli. Haettu 28.1.2023 osoitteesta <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/suomalainen-homemalli/>

Tolppanen, J., Karjalainen, M., Lahtela, T., Viljakainen, M. (2013). Suomalainen puukerrostalo -Rakenteet, suunnittelu ja rakentaminen. Puuinfo. Opetushallitus.

Vinha, J., Heljo, J., Lähdesmäki, K., Pentti, M., Suonketo, J., Åström, G. (2014). RIL 255-1-2014, Rakennusfysiikka 1, Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Vinha, J., Laukkarinen, J., 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. (2013). Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampereen yliopisto. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-2949-8>

Ympäristöministeriö. (2022). Selvitys: Puurakentaminen hienoisessa kasvussa asuinkerrostaloissa. Haettu 11.1.2023 osoitteesta <https://ym.fi/-/selvitys-puurakentaminen-hienoisessa-kasvussa-asuinkerrostaloissa>

Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toiminnasta 782/2017. Haettu 11.1.2023 <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170782#Pidm45053758482048>

Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta 848/2017. Haettu 11.1.2023 osoitteesta <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2017/20170848#L1P4>

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta, 2017/1010. Haettu 3.2.2023 osoitteesta <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010>

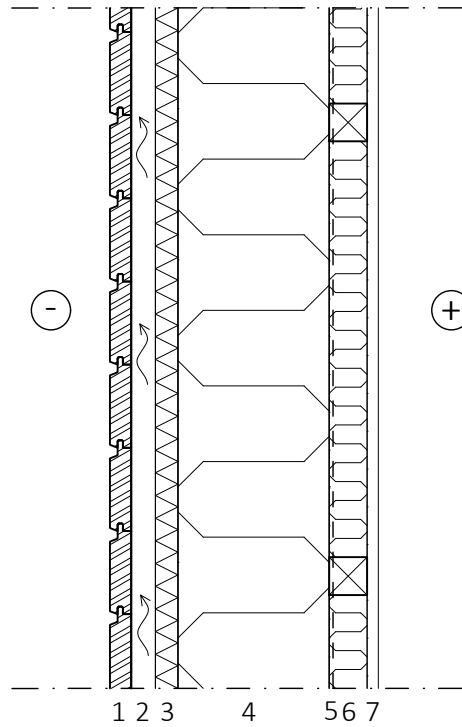
Åström, G., Nousiainen, A., Malmberg, J., Valjus, J., Vinha, J., Reinikainen, E., Laine, K., Mannonen, P., Viitanen, H., Metiäinen, P. (2020). RIL 250-2020, Kosteuden hallinta ja homevaurioiden estäminen. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Kaup.osa/Kylä	Kortteli/Tila	Tontti/Rno	Viranomaisen merkintöjä
Pysyvä rakennustunnus			Korkeus- ja koord. järjestelmä
Rakennustoimenpide			Piirustuslaji No
Rakennuskohteen nimi ja osoite OPINNÄYTETYÖ LIITE 1 TIIA-LIISA HAAPALA			Piirustuksen sisältö Mittakaavat RAKENNETYYPPIPIIRUSTUKSET 1:10
SITOWISE Mikonkatu 4D 28100 Pori 020 747 6000 www.sitowise.com			Suunn.ala Työnumero Piir.no Muutos RAK
Piirtäjä THAA	Suunnittelija		Tiedostojainti D:\
Tarkastaja	Vast.suun/Hyväksyjä		Päiväys Tiedosto 4.4.2023 .dwg

Rakennuskohteen nimi ja osoite
OPINNÄYTETYÖ
LIITE 1
TIIA-LIISA HAAPALA

Piirustuksen sisältö
RANKARAKENTEINEN ULKOSEINÄ,
PUUVERHOILU

1:10



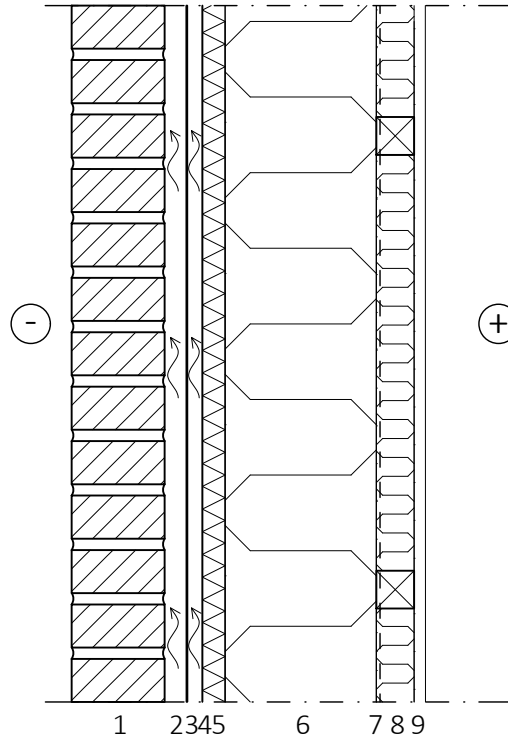
- | | | |
|----------|---|---|
| - | 1 | Maalattu puuverhoilu, väh. 28mm paksu lauta |
| 32 mm | 2 | Tuuletusväli väh. 32mm pystysuoralla koolauksella. Palokatko joka kerrokseen. |
| 30 mm | 3 | Tuulensuojalevy, mineraalivilla. Kokonaislämmönvastus väh. 0,5 m ² K/W (väh. $\lambda=0,04$ W/mK). Homehtumisherkkyyssluokka HHL2. |
| 200 mm | 4 | Lämmöneriste mineraalivilla ja kantava runko |
| | 5 | Höyryn- ja ilmansulku |
| 50 mm | 6 | Asennustila max. 50mm, lämmöneristys ja koolaus |
| 15-18 mm | 7 | Suojaverhoilu, kipsilevy |

U-arvo = 0,17 W/m²K

Rakennuskohteen nimi ja osoite
OPINNÄYTETYÖ
LIITE 1
TIIA-LIISA HAAPALA

Piirustuksen sisältö
RANKARANKENTEINEN ULKOSEINÄ,
TIILIVERHOILU, KORKEUS YLI 10M

1:10



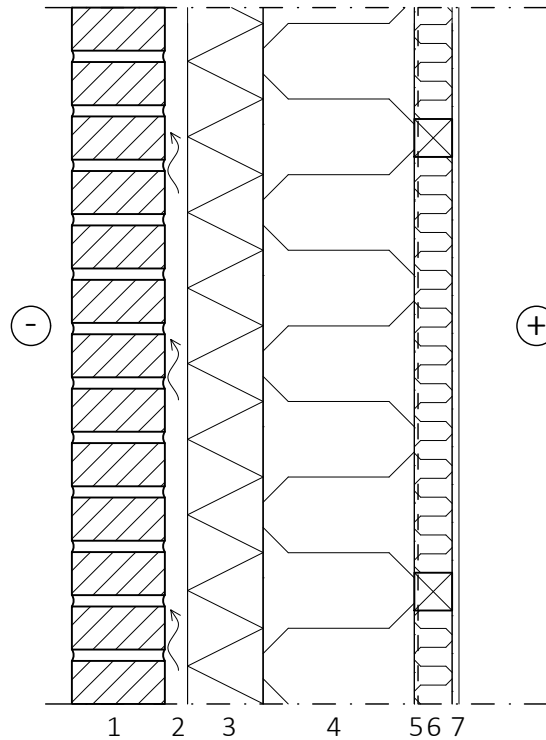
- | | | |
|----------|---|--|
| - | 1 | Tiiliverhoilu, väh. 80 mm paksu tiili ja muuraus täysin saumoin, jotka tiivistettävä |
| 30 mm | 2 | Tuuletusväli väh. 30mm. Varmistettava, että pysyy avoimena. |
| | 3 | Sadetakkipelti, teräsohutlevy |
| 20 mm | 4 | Tuuletusväli väh. 20mm |
| 30 mm | 5 | Tuulensuojalevy, mineraalivilla. Kokonaislämmönvastus väh. 0,5 m ² K/W (väh. $\lambda=0,04$ W/mK). Homeutumisherkkyysluokka HHL2. |
| 200 mm | 6 | Lämmöneriste mineraalivilla ja kantava runko |
| | 7 | Höyryn- ja ilmansulku |
| 50 mm | 8 | Asennustila max. 50mm, lämmöneristys ja koolaus |
| 15-18 mm | 9 | Suojaverhous, kipsilevy |

Ominaisuudet U-arvo = 0,17 W/m²K

Rakennuskohteen nimi ja osoite
OPINNÄYTETYÖ
LIITE 1
TIIA-LIISA HAAPALA

Piirustuksen sisältö
RANKARAKENTEINEN ULKOSEINÄ,
TIILIVERHOILU, KORKEUS ALLE 10 M

1:10



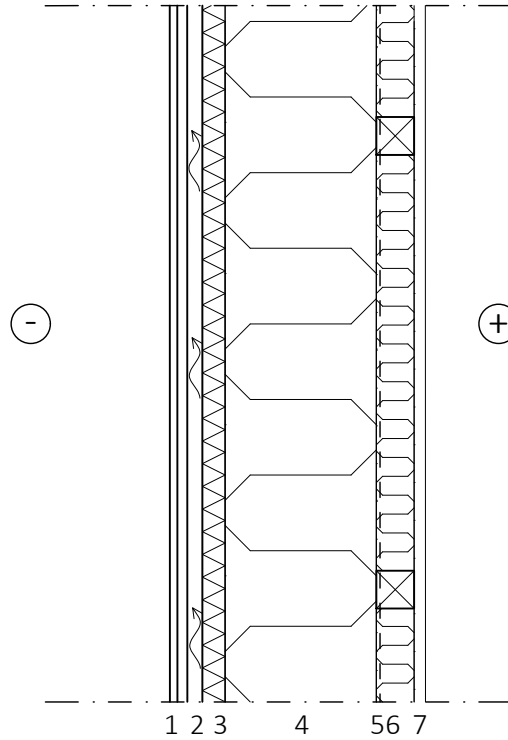
- | | | |
|--------|---|---|
| - | 1 | Tiiliverhoilu, väh. 120 mm paksu tiili ja muuraus täysin saumoin, jotka tiivistettävä |
| 40 mm | 2 | Tuuletusväli väh. 40mm (ril 107-2022, s.91) Varmistettava, että pysyy avoimena. |
| 100 mm | 3 | Tuulensuojalevy, mineraalivilla. Kokonaislämmönvastus väh. 3,0 m ² K/W (väh. $\lambda=0,033$ W/mK). Homeutumisherkkyyssluokka väh. HHL3. |
| 200 mm | 4 | Lämmöneriste mineraalivilla ja kantava runko |
| | 5 | Höyryn- ja ilmansulku, hygrokalvo |
| 50 mm | 6 | Asennustila max. 50mm, lämmöneristys ja koolaus |
| 9 mm | 7 | Suojaverhous, kipsilevy |

Ominaisuudet U-arvo = 0,14 W/m²K

Rakennuskohteen nimi ja osoite
OPINNÄYTETYÖ
LIITE 1
TIIA-LIISA HAAPALA

Piirustuksen sisältö
RANKARAKENTEINEN ULKOSEINÄ,
LEVYRAPPAAUS

1:10



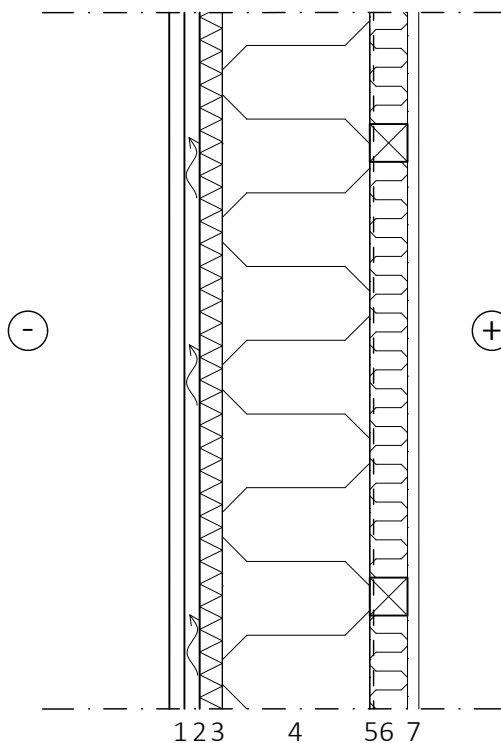
- | | | |
|----------|---|--|
| - | 1 | Ohutrapattu sementtipohjainen rakennuslevy |
| 20 mm | 2 | Tuuletusväli väh. 20mm. Koolaus rakennuslevyvalmistajan ohjeen mukaan |
| 30 mm | 3 | Tuulensuojalevy, mineraalivilla. Kokonaislämmönvastus väh. $0,5 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ (väh. $\lambda=0,04 \text{ W}/\text{mK}$). Homehtumisherkkyyssluokka väh. HHL2. |
| 200 mm | 4 | Lämmöneriste mineraalivilla ja kantava runko |
| | 5 | Höyryn- ja ilmansulku |
| 50 mm | 6 | Asennustila max. 50mm, lämmöneristys ja koolaus |
| 15-18 mm | 7 | Suojaverhous, kipsilevy |

Ominaisuudet U-arvo = $0,17 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$

Rakennuskohteen nimi ja osoite
OPINNÄYTETYÖ
LIITE 1
TIIA-LIISA HAAPALA

Piirustuksen sisältö
RANKARAKENTEINEN ULKOSEINÄ,
TERÄSKASETTIVERHOILU

1:10



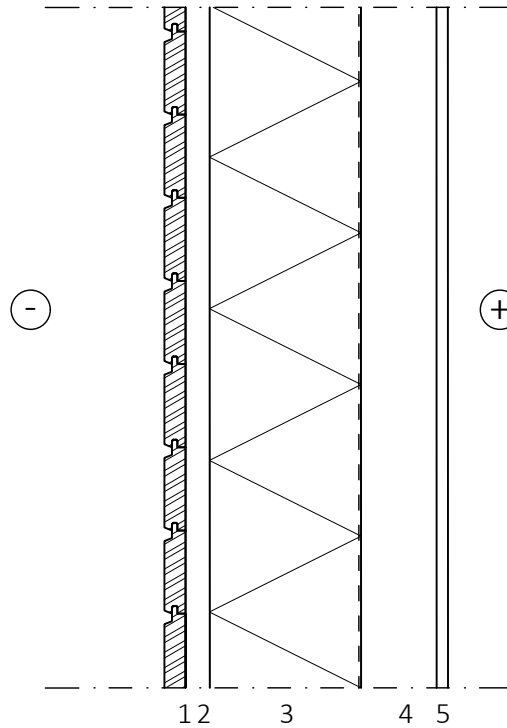
-	1	Teräskasettiverhoilu
20 mm	2	Tuuletusväli väh. 20mm verhoiluvalmistajan ohjeen mukaan
30 mm	3	Tuulensuojalevy, mineraalivilla. Kokonaislämmönvastus väh. 0,5 m ² K/W (väh. $\lambda=0,04$ W/mK). Homehtumisherkkyyssluokka väh. HHL2.
200mm	4	Lämmöneriste mineraalivilla ja kantava runko
	5	Höyryn- ja ilmansulku
50 mm	6	Asennustila max. 50mm, lämmöneristys ja koolaus
15-18 mm	7	Suojaverhous, kipsilevy

Ominaisuudet U-arvo = 0,17 W/m²K

Rakennuskohteen nimi ja osoite
OPINNÄYTETYÖ
LIITE 1
TIIA-LIISA HAAPALA

Piirustuksen sisältö
MASSIIVIPUURUNKO,
PUUVERHOILU

1:10



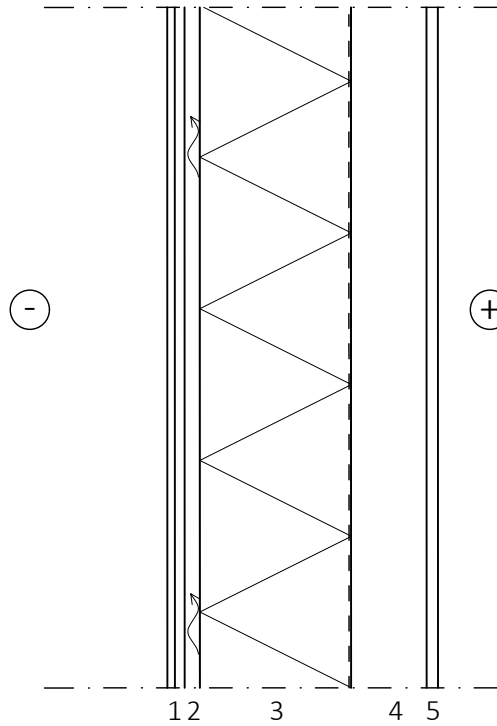
- | | | |
|----------|---|--|
| - | 1 | Maalattu puuverhoilu, väh. 28mm paksu lauta |
| 32 mm | 2 | Tuuletusväli väh. 32mm, palokatko joka kerrokseen. |
| 200 mm | 3 | Jäykkä mineraalivilla, jossa tuulensuojakalvo |
| 160 mm | 4 | CLT-massiivipuurunko |
| 15-18 mm | 5 | Suojaverhous, kipsilevy |

Ominaisuudet U-arvo = 0,14 W/m²K

Rakennuskohteen nimi ja osoite
OPINNÄYTETYÖ
LIITE 1
TIIA-LIISA HAAPALA

Piirustuksen sisältö
MASSIIVIPUURUNKO,
LEVYRAPPAAUS

1:10



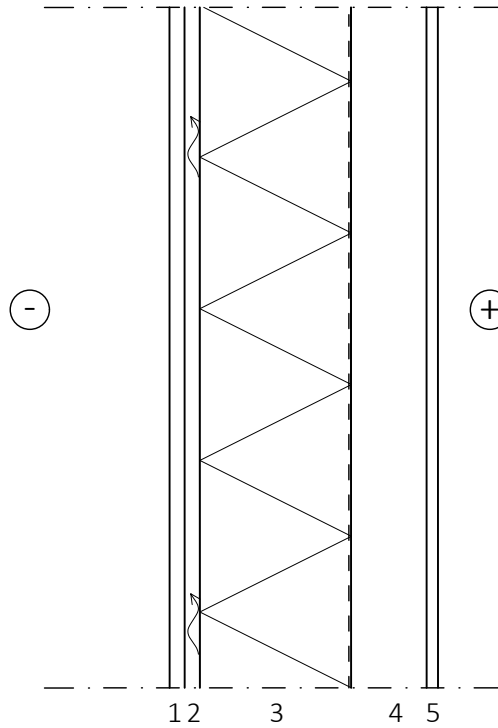
- | | | |
|----------|---|---|
| - | 1 | Ohutrapattu sementtipohjainen rakennuslevy |
| 20 mm | 2 | Tuuletusväli väh. 20mm |
| 200 mm | 3 | Jäykkä mineraalivilla, jossa tuulensuojakalvo |
| 160 mm | 4 | CLT-massiivipuurunko |
| 15-18 mm | 5 | Suojaverhous, kipsilevy |

Ominaisuudet U-arvo = 0,14 W/m²K

Rakennuskohteen nimi ja osoite
OPINNÄYTETYÖ
LIITE 1
TIIA-LIISA HAAPALA

Piirustuksen sisältö
MASSIIVIPUURUNKO,
TERÄSKASETTIVERHOILU

1:10



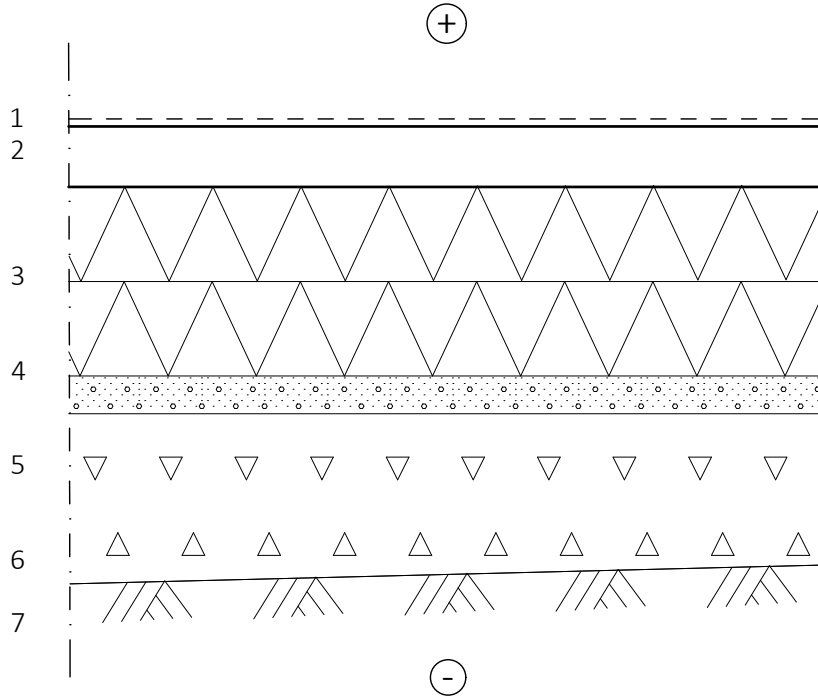
-	1	Teräskasettiverhoilu
20 mm	2	Tuuletusväli väh. 20mm
200 mm	3	Jäykkä mineraalivilla, jossa tuulensuojakalvo
160 mm	4	CLT-massiivipuurunko
15-18 mm	5	Suojaverhous, kipsilevy

Ominaisuudet U-arvo = 0,14 W/m²K

Rakennuskohteen nimi ja osoite
OPINNÄYTETYÖ
LIITE 1
TIIA-LIISA HAAPALA

Piirustuksen sisältö
MAANVARAINEN ALAPOHJA

1:10



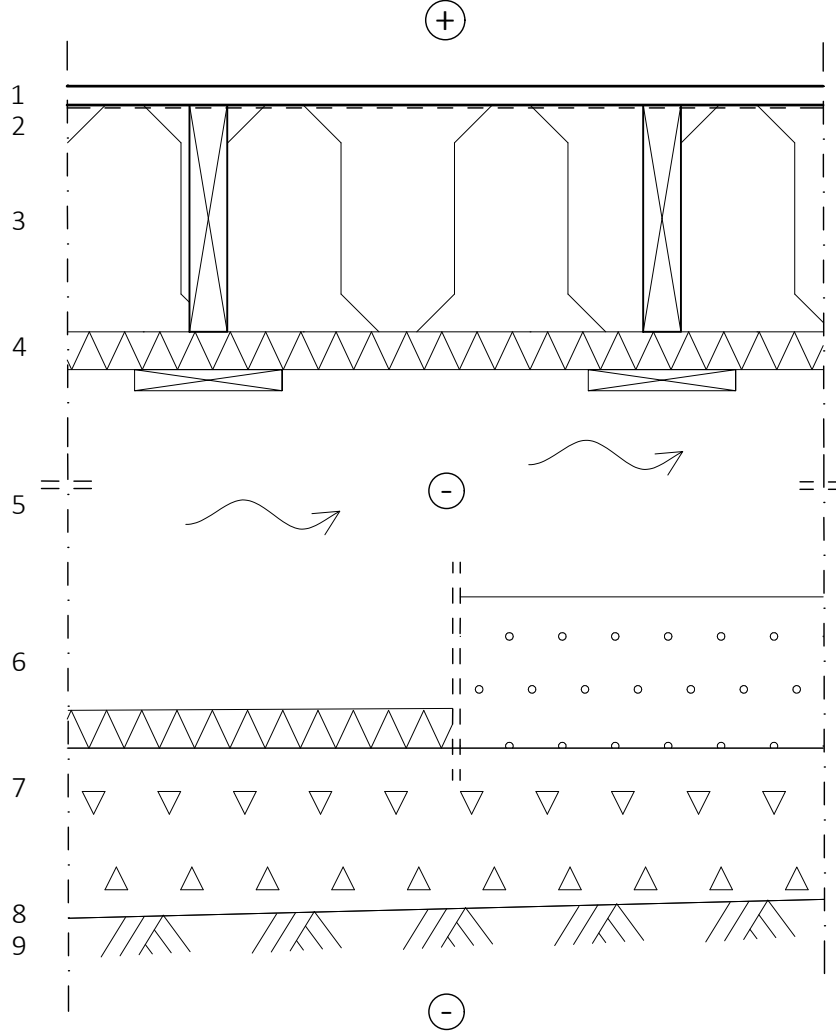
- | | | |
|--------|---|--|
| - | 1 | Lattian pintakäsittely |
| 80 mm | 2 | Teräsbetoni-laatta, väh. 80mm |
| 250 mm | 3 | Lämmöneriste, EPS-levy, saumat limitetty, 200-300 mm |
| | 4 | Tarvittaessa suodatinkangas ja tasaushiekkakerros |
| 200 mm | 5 | Kapilaarikatkosora väh. 200mm |
| | 6 | Suodatinkangas |
| | 7 | Perusmaa, kallistukset salaojia kohti |

Ominaisuudet U-arvo = 0,14 W/m²K

Rakennuskohteen nimi ja osoite
OPINNÄYTETYÖ
LIITE 1
TIIA-LIISA HAAPALA

Piirustuksen sisältö
TUULETTUVA ALAPOHJA,
RANKARAKENNE, KYLMÄ

1:10



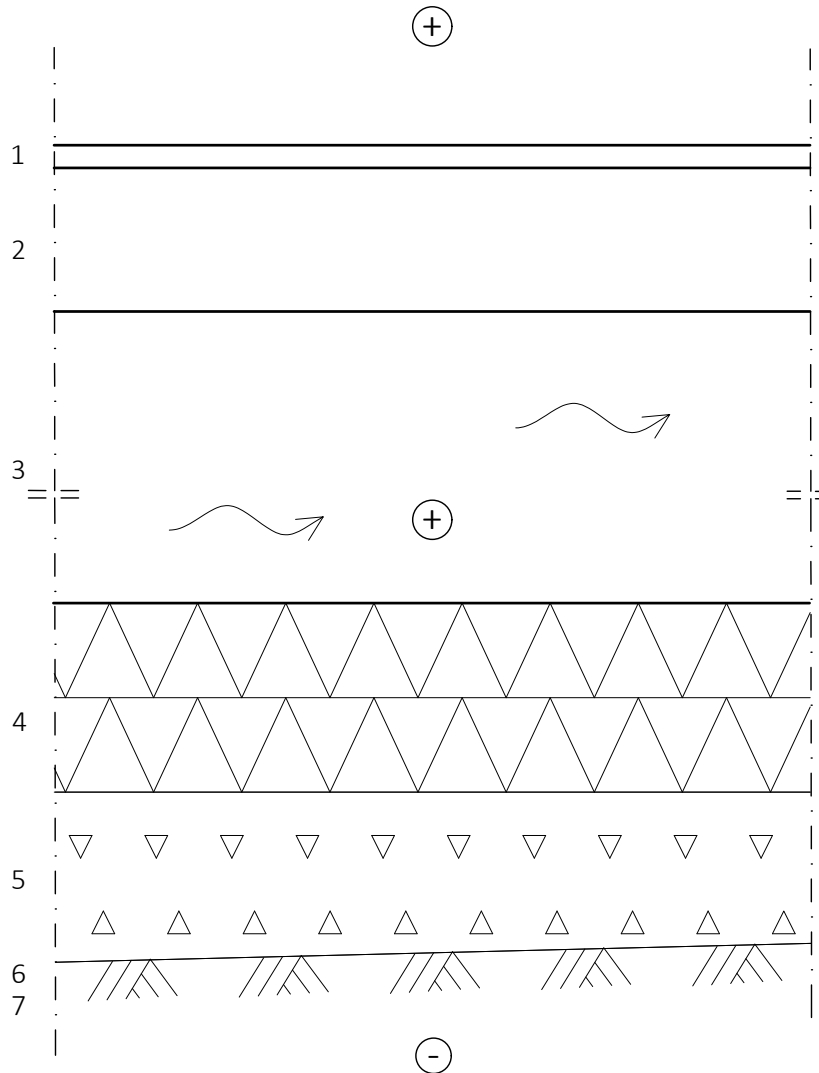
- | | | |
|--------|---|---|
| - | 1 | Lattian pintakäsittely |
| | 2 | Hyöryn- ja ilmansulkukerros |
| 300 mm | 3 | Mineraalivilla eristys ja puurunko |
| 50 mm | 6 | Tuulensuojalevy, homeutumisherkkyyssluokka väh. HHL3. Laudat painekyllästettyä puuta. |
| 800 mm | 5 | Ulkoilmaan tuulettuva ryömintätila, korkeus vähintään 800mm |
| 50 mm | 6 | Lämmöneriste, EPS-levy, saumat limitetty, 50-100mm
TAI |
| 200 mm | 6 | Lämmöneristys, kevytsora |
| 200 mm | 7 | Kapilaarikatkosora väh. 200mm |
| | 8 | Suodatinkangas |
| | 9 | Perusmaa, kallistukset salaojia kohti |

Ominaisuudet U-arvo = 0,15 W/m²K

Rakennuskohteen nimi ja osoite
OPINNÄYTETYÖ
LIITE 1
TIIA-LIISA HAAPALA

Piirustuksen sisältö
TUULETTUVA ALAPOHJA,
MASSIIVIPUURAKENNE, LÄMMIN

1:10



- | | | |
|--------|---|---|
| - | 1 | Lattian pintakäsittely |
| | 2 | CLT-massiivilaatta |
| 800 mm | 3 | Lämmin sisäpuolelta koneellisesti tuuletettu ryömintätila, korkeus väh. 800mm |
| 250 mm | 4 | Lämmöneriste, EPS-levy, saumat limitetty |
| 200 mm | 5 | Kapilaarikatkosora väh. 200mm |
| | 6 | Suodatinkangas |
| | 7 | Perusmaa, kallistukset salaojia kohti |

Ominaisuudet U-arvo = 0,15 W/m²K