

Saimaan ammattikorkeakoulu
Tekniikka, Lappeenranta
Rakentamisen koulutusohjelma
Ylempi ammattikorkeakoulututkinto

Huovinen Jani

Kivirakenteisen pientalon passiivitalokonsepti

Tiivistelmä

Huovinen Jani

Kivirakenteisen pientalon passiivitalokonsepti, 47 sivua.

Saimaan ammattikorkeakoulu

Tekniikka, Lappeenranta

Rakentamisen koulutusohjelma

Ylempi ammattikorkeakoulututkinto

Opinnäytetyö 2012

Ohjaajat: Lehtori Timo Lehtoviita, Saimaan ammattikorkeakoulu, Tuotekehityspäällikkö Tuomo Sahlsten, Lakan Betoni Oy

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää suunnitteluratkaisujen näkökulmasta kivirakenteisen pientalon passiivitalokonsepti. Sisältö rajattiin rakennuksen ulkovaipan rakennusosiin ja liitoksiin. Työssä perehdyttiin matalaenergiarakenteista tehtyihin tutkimuksiin sekä rakentamisen viranomaismääräyksiin ja ohjeisiin. Näitä työn teoriaosuudessa käsiteltyjä lähteitä hyödynnettiin passiivitalokonseptin suunnitteluratkaisuissa.

Konseptin ytimen muodostaa betonisandwich-ulkoseinäelementti, jonka mitat ja yksityiskohdat määrittelevät muiden rakennusosien valintaa. Ulkoseinäraakenteen rakennusfysikaalisen toiminnan kannalta kaikki tutkitut eristevaihtoehdot ovat käyttökelpoisia. Huokoisia eristeitä käytettäessä on passiivitasen eristepaksuudella kiinnitettävä huomiota eristeen ilmanläpäisevyyteen tai eristeessä tapahtuvaa luonnollista konvektiota tulee vähentää rakenteellisin keinoin. Eristemateriaalin valinta muodostui tarvittavan eristepaksuuden mukaan niin, että kokonaisuuden mitat säilyivät järkevinä. Ulkoseinäelementin eristeeksi valikoitui polyuretaani, jolloin tarvittava eristepaksuus mahdollistaa vakiokiinnikkeiden käytön ja rakennusosien välisten liitosten toimivuuden.

Kivirakenteisen passiivitalon suunnittelussa tulee huomioida lämmöneristävyyden lisäksi rakennusosien ja liitosten kylmäsiljat sekä varmistaa hyvä ilmatiiveys. Liitoksen kohdalla lämmöneristävyys ei saa heikentyä verrattuna liittyviin rakennusosiin. Kylmäsiljat minimoidaan käyttämällä liitoksen kohdalla betonia alhaisemman lämmönjohtavuuden materiaaleja. Ilmatiiveys varmistetaan liitosten porrastuksilla sekä tiivistystuotteilla. Suunnitteluratkaisuista muodostuva kokonaisuus täyttää kylmäsiltojen, lämmöneristävyyden ja tiiveyden osalta passiivitalojen ohjeelliset vaatimukset. Opinnäytetyössä kehitetty suunnitteluratkaisujen passiivitalokonsepti toimii kivirunkoisten talojen ulkovaipan suunnittelun ohjeistuksena, kun tavoitteena on passiivienergiatalo. Samat periaatteet toimivat monelta osin myös muista materiaaleista tehtävissä pientaloissa.

Suurimmat riskit rakenteiden toimivuudelle aiheutuvat mahdollisista työ- ja asennusvirheistä. Työmaan asennuksen ohjeistuksella sekä työmaan ja seinäelementtitehtaan työn johdolla on tästä syystä onnistuneen lopputuloksen kannalta suuri merkitys.

Asiasanat: Passiivitalo, Kivitalo, Passiivitalokonsepti

Abstract

Huovinen Jani

Passivhouse concept into the stonehouse, 47 Pages.

Saimaa University of Applied Sciences, Lappeenranta

Technology, Construction Engineering

Bachelor's Thesis 2012

Instructor(s): Lecturer Mr Timo Lehtoviita Saimaa University of Applied Sciences, Product development manager Mr Tuomo Sahlsten

The purpose of the study was to develop a passive house concept made of stone. The external building parts and the junctions of building parts included in the study.

Earlier research of low-energy buildings was exploited in the study. Also the official Finnish guidelines and recommendations on construction are presented in the theoretical framework of the study.

The very core of the concept is the sandwich concrete-element which determines the selection of other building parts. In this study three different insulation materials used in the sandwich element were detected. This study points out, that all the detected materials can be used in the outside wall of the passive house. In the concept resulted from the study, the polyuretan were selected to use as an insulation material because of its ability to make wall elements thinner. In addition, with polyuretan, it is possible to use basic solutions on the junctions and other building parts available on the market.

When the external parts of the building are very high insulation made is more important to get attention to the junctions of the parts and coldbridges. In this concept all parts joint was plan to be airtight and minimize coldbridges. It is important that insulation is as good in junction as in jointed building parts. There must use material in the junctions which have lower warmconductivity than concrete. The same passive house concept can be used by architects and engineers who plan stoneframed passivhouses.

External parts of passive house is more safe to make inside factory than outside in construction site. When building a passive house there must be building directions and checklist to construction site. In addition, it is important that quality of factory which manufacturing outsidewalls is in order.

Keywords: Passive house, Stonehouse, Concept of passive house

Sisältö

Käsitteet.....	5
1 Johdanto.....	6
2 Rakennusten energiatehokkuus.....	9
2.1 Energiatehokkuutta säätelevät määräykset ja ohjeet.....	10
2.2 Lämpöhäviöt.....	11
2.3 Vuotoilma.....	11
2.4 Lämpö- ja kosteusvirrat rakenteessa.....	12
3 Ulkovaipan rakennusosat.....	13
3.1 Betonisandwich-ulkoseinä.....	14
3.1.1 Eristemateriaalin vaikutus U-arvolaskentaan.....	14
3.1.2 Ilmarakojen vaikutus lämmöneristävyyteen.....	15
3.1.3 Kylmäsiltojen vaikutus lämmöneristävyyteen.....	16
3.1.4 Ulkoseinän lämmöneristävyys.....	16
3.2 Alapohja.....	17
3.2.1 Maanvarainen alapohja.....	18
3.2.2 Tuulettuva alapohja.....	20
3.3 Yläpohja.....	22
3.4 Ikkunat ja ovet.....	24
3.5 Muut rakennusosat ja liitokset.....	25
4 Tulokset.....	26
4.1 Ulkoseinä.....	26
4.1.1 Sisäkuoren toiminta.....	27
4.1.2 Eristeen toiminta.....	29
4.1.3 Ulkokuoren toiminta.....	30
4.1.4 Yhteenveto.....	31
4.2 Alapohja.....	32
4.3 Yläpohja.....	35
4.4 Ikkunat ja ovet.....	37
4.5 Passiivitalokonseptin ohjeistus.....	39
5 Yhteenveto ja pohdinta.....	41
Kuvat.....	44
Taulukot.....	44
Lähteet.....	45
Liitteet	
Liite 1. Wufi-laskennan reunaehdot ja tulokset	

Käsitteet

Passiivitalokonsepti on passiivitalon vaatimukset täyttävä dokumentoitu suunnittelu- ja rakentamistapa, joka on monistettavissa useampaan kohteeseen. Konsepti perustuu vakiotuotannossa oleviin avaintuotteisiin sekä suunnittelu-, rakentamis- ja käyttöohjeisiin.

Passiivitalolla tarkoitetaan rakennusta, jossa tilojen lämmityksen ja jäähdytyksen ostoenergian ominaiskulutus ja nettoenergian ominaistarve on enintään 25 kWh/(m²a).

Nettoenergian ominaistarve (kWh/(m²a)) muodostuu rakennuksen lämpöhäviöenergioista, josta vähennetään tiloihin kohdistuvat lämpökuormat.

Ostoenergian ominaiskulutus (kWh/(m²a)) käsittää tilan lämmitykseen ja jäähdyttämiseen hankittavan energian.

Rakennusosa on toiminnallinen kokonaisuus, johon voi sisältyä useita eri materiaaleja esim. ulkoseinä.

Rakennusvaippa muodostuu niistä rakennusosista, jotka rajaavat lämpimän tilan ulkoilmasta, maaperästä ja lämmittämättömästä tilasta.

Ilmanvuotoluku n_{50} (1/h) on arvo, joka kertoo, kuinka monta kertaa tunnissa rakennuksen ilma vaihtuu 50 Pa paine-erolla rakennusvaipan läpi.

Ilmanvuotoluku q_{50} (m³/(h m²)) on arvo, joka kertoo, vuotoilman määrän kuutiolina vaipan pinta-alaa kohti, joka siirtyy 50 Pa paine-erolla vaipan läpi tunnissa.

E-luku (kWh/(m²a)) on energiakertoimilla painotettu rakennuksen laskennallinen kokonaisenergiankulutus vuodessa.

1 Johdanto

Vaatimukset rakennusten lämmöneristävyydestä ja energiatehokkuudesta ovat viime vuosina kiristyneet merkittävästi. Todennäköisesti tulevaisuudessa muutosvauhti tulee olemaan vähintäänkin yhtä nopeaa. Tämä asettaa rakentamisen laadulle, käytettäville materiaaleille ja niiden valmistukselle haasteita.

Tuote- ja taloteollisuudessa kiristyneet lämmöneristävyydsmääräykset ovat näkyneet rakenteiden paksuuden kasvamisena. Käytännössä tämä tarkoittaa rakenteiden lämmöneristepaksuuksien lisääntymistä. Eristepaksuuden kasvaessa myös rakenteiden toiminta voi muuttua eikä ole samantekevää, minkälaisia eristeitä rakenteissa käytetään. Lisäksi eristepaksuuden lisääntyminen vaikuttaa rakenteiden sekä täydentävien osien kuten ikkunoiden ja ovien liitoksiin. Energiatehokkuuteen vaikuttaa lämmöneristävyyden lisäksi merkittävästi rakennuksen ilmanpitävyys ja kylmäsiljat, jotka tulee huomioida suunnittelussa ja työmaalla.

Energiatehokkuusmääräyksissä siirryttiin vuoden 2012 heinäkuussa rakennusten energiankulutuksen kokonaistarkasteluun. Tämä johtaa rakennus- ja rakennesuunnittelun sekä talotekniikan osalta kokonaisuuksien hallintaan. Rakennusteknisten asioiden lisäksi kokonaisuuteen vaikuttavat merkittävästi arkkitehtuuri, talotekniikka ja käytettävät lämmönlähteet. Uusiutuvien energialähteiden käyttöön ohjataan määräyksissä erillisten energiakertoimien avulla.

Yksi ratkaisu energiatehokkaiden rakennusten toteutukseen on Saksasta peräisin oleva passiivitalokonsepti. Passiivitalossa vähennetään lämmitykseen ja jäähdytykseen käytettävän energian tarvetta rakenteellisilla ratkaisuilla sekä tehokkaalla ilmanvaihdon lämmöntalteenotolla. Passiivitalon rakenteelliset ratkaisut vähentävät tai poistavat kokonaan perinteisten lämmitysjärjestelmien tarpeen talossa. Passiivitalon määritelmän mukaisen rakennuksen toteuttamiselle Suomessa on laadittu ohjeellisia arvoja rakennusosien lämmöneristävyydelle ja

ulkovaipan tiiveydelle. Ohjeet perustuvat passiivitalolle energiankulutuksesta ja energiantarpeesta asetettuihin vaatimuksiin. Kaikista Suomessa rakennettavista pientaloista vain murto-osa toteutetaan tällä hetkellä passiivitalona.

Nykyisin pientaloista rakennetaan suurin osa erityyppisinä talopaketteina ja har-
tiapankkirakentamisen osuus on hyvin pientä. Kiristyvät vaatimukset tulevat en-
tistä enemmän vähentämään omatoimirakentamista ja todennäköisesti toimitet-
tavien talopakettien valmiusaste tulee nousemaan. Valtaosa nykyisin toimitetta-
vista talopaketeista on puurakenteisia. Kivitalojen osuus talopaketeista on noin
10-15 %.

Tulevaisuudessa erilaisten betoniharkko- ja betonielementtien käyttö pientalois-
sa tulee todennäköisesti kasvattamaan osuuttaan. Rakennepaksuuksien kas-
vaessa eri materiaalikerrosten yhteensovittaminen ja laadun varmistaminen vai-
keutuvat, jolloin mahdollisimman yksinkertaisilla rakenteilla saavutetaan helpoi-
ten toimivia kokonaisuuksia. Lisäksi kivirakenteisten talojen etuja ovat energia-
tehokkuuden kannalta tiiveys ja terminen massa.

Talopakettivalmistajien kannalta tulee olemaan entistä tärkeämpää kyky tarjota
asiakkaille valmiita suunnitteluratkaisuja ja toteutusmalleja energiatehokkuuden
ja rakentamisen laadun varmistamiseksi erityyppisissä talomalleissa.

Nopeasti kehittyvien rakentamisen energiatehokkuusvaatimusten vuoksi on tär-
keää kehittää tutkittuja sekä toimivia vakioratkaisuja erityyppisiin matalaener-
giataloihin.

Tutkimustehtävät

Tämän tutkimuksen tavoitteena on kehittää suunnitteluratkaisujen näkökulmas-
ta passiivitalokonsepti kivirakenteisiin pientaloihin. Konseptin on tarkoitus vasta-
ta VTT:n rakennustarvikkeille ja rakennusfysikaaliselle toiminnalle passiivitalo-
tuotteen sertifiointissa asettamia vaatimuksia. Arvioinnin kohteet näiden osalta
on esitetty sertifiointiperusteissa kohdassa d) rakennusfysikaalinen toiminta ja f)

rakennustarvikkeet. Sertifiointin vaatimukset on esitetty kokonaisuudessaan VTT:n sertifiointiperusteissa R042/09.

Ulkoseinäarakenteiden osalta tutkitaan betonisandwich-rakenteita. Lisäksi selvitetään kivirakenteen hyödyntämismahdollisuudet passiivitaloissa. Muiden passiivitalokonseptiin kehitettävien suunnitteluratkaisujen osalta tavoitteena on myös niiden soveltuvuus harkkorakentamiseen.

Passiivitalokonseptin kehittämisen taustalle valitaan RIL 249-2009 julkaisussa esitetyt tekniset avaintekijät. Näitä ovat rakennuksen vaipan tiiveys, ulkovaipan lämmöneristävyys ja kylmäsiltojen poistaminen.

Passiivitalojen talotekniikkaa käsitellään tutkimuksessa vain rakenteisiin vaikuttavien seikkojen osalta. Muilta osin talotekniikka rajataan tutkimuksen ulkopuolelle.

Määriteltyjen sertifiointiperusteiden ja teknisten avaintekijöiden pohjalta työn keskeisiä tutkimustehtäviä ovat seuraavat:

- Mikä eristemateriaali soveltuu parhaiten bsw-elementeillä toteutettavan passiivitalon seinäarakenteeseen?
- Mitä vaikutuksia eristepaksuudella ja materiaalilla on ulkoseinäelementin rakennusfysikaaliseen toimintaan ja liittyviin rakenteisiin?
- Millaiset runkovaipan rakennusosat ja liitokset toimivat yhdessä seinäelementin kanssa niin, että kokonaisuus täyttää passiivitason?

Opinnäytetyössä perehdytään matalaenergiarakentamisen asettamiin vaatimuksiin sekä suunnitellaan rakenneratkaisut, joilla passiivitalolle asetetut vaatimukset runkovaipan osalta ovat saavutettavissa.

Opinnäytetyön runko muodostuu teoria- ja tulososioista. Teoriaosuudessa käsitellään matalaenergiarakenteiden ja rakennustarvikkeiden rakennusfysikaalista toimintaa ja ominaisuuksia. Tulososiossa tuodaan esille passiivitalokonseptiin valitut ratkaisut perusteluineen.

2 Rakennusten energiatehokkuus

Rakennuksen energiatehokkuus muodostuu järkevistä ratkaisuista, joilla vähennetään rakennuksen käyttötarkoitusta vastaavien toimintojen ylläpitämiseksi vaadittavan energian ominaiskulutusta. Tähän tähtäävät myös kansalliset rakennuksille asetetut energiatehokkuuden viranomais määräykset ja ohjeet.

Rakennuksen energiatehokkuutta tarkastellaan laskennallisella E-luvulla, joka kuvaa rakennuksen energiakertoimilla painotettua vuosittaista ostoenergian määrää. Kokonaisenergiankulutusta kuvaava E-luku lasketaan rakennuksen lämmitettävää nettoalaa kohti. (D3 Rakennusten energiatehokkuus 2012.)

Rakennuslupaa haettaessa on energiatehokkuuden määräysten mukaisuus osoitettava energiaselvityksellä. Energiaselvitykseen sisältyvät E-luvun lisäksi lämpöhäviöiden tasauslaskelma, laskennan lähtötiedot ja tulokset sekä kesäaikaisen huonelämpötilan ja tarvittaessa jäähdytyksen tarkastelut. (Kurnitski 2012.)

Rakennusten kokonaisenergiankulutuksen tarkastelu ohjaa energiatehokkuutta parantavaan suunnitteluun, jossa asetetun E-lukutavoitteen perusteella valitaan rakennuksen perusratkaisut. Suunnitteluprosessissa rakennusfysikaalinen suunnittelu sekä energiatehokkuuden ja talotekniikan suunnittelu ovat alusta asti mukana suunnittelussa. (Kurnitski 2012.)

Rakennusfysikaaliseen suunnitteluun on kiinnitettävä erityistä huomiota silloin, kun rakennusosien lämmönläpäisykertoimet ovat määräysten mukaisia vertailuarvoja pienempiä (D3 Rakennusten energiatehokkuus 2012).

Tämän työn tavoitteena olevalla passiivitalokonseptilla voidaan vaikuttaa rakennuksen energiatehokkuuteen rakenneratkaisujen kautta. Käytännössä tämä tarkoittaa rakennuksen vaipan lämpöhäviöiden ja vuotoilman pienentämistä.

Suunniteltavan passiivitalokonseptin lämmönläpäisykertoimien ja ominaisuuksien tavoitearvot rakennusosille on esitetty taulukossa 1.

Rakennusosa	U-arvo (W/m ² K)
Ulkoseinä ja alapohja	0,09
Yläpohja	0,07
Ikkunat ja ovet	0,7-0,8
Ilmanvuotoluku n ₅₀	<0,6 1/h

Taulukko 1. Passiivitalokonseptin avaintekijöiden tavoitearvot

2.1 Energiatehokkuutta säätelevät määräykset ja ohjeet

Rakennusten energiatehokkuutta säätelevät kansalliset määräykset ja ohjeet, joiden taustalla on Euroopan parlamentin toukokuussa 2010 hyväksymä direktiivi rakennusten energiatehokkuudesta (2010/31/EU). Tämän seurauksena uudistettiin kansallisia säädöksiä, jotka tulivat voimaan heinäkuussa 2012. Direktiivi ohjaa rakentamista matalaenergiarakentamisesta nollaenergiataloihin uudisrakentamisessa vuoteen 2020 mennessä.

Suomen rakentamismääräyskokoelmassa määritellään tämän hetken kansalliset rakennusten energiatehokkuusvaatimukset. Energiatehokkuuden määräykset ja ohjeet löytyvät seuraavista osista:

- C3 (2010) Rakennuksen lämmöneristys. Määräykset.
- C4 (2003) Lämmöneristys. Ohjeet.
- D2 (2012) Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Määräykset ja ohjeet.
- D3 (2012) Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet.
- D5 (2007) Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Ohjeet.

Yllä olevista Suomen rakentamismääräyskokoelman osista ovat uudistumassa vuoden 2012 aikana osa D5 ja C4. Näistä uudistuvista osista on olemassa luonnokset. Rakennusosien lämmönläpäisykertoimien määrittäminen tehdään tässä työssä ohjeen C4 16.3.2012 luonnokseen perustuen.

2.2 Lämpöhäviöt

Rakennuksen runkovaipan lämmöneristävyys, tiiveys ja ilmanvaihtojärjestelmä vaikuttavat rakennuksen energiatehokkuuteen. Kokonaislämpöhäviöt muodostuvat näiden tekijöiden vaikutuksesta vaipan, vuotoilman ja ilmanvaihdon lämpöhäviöistä. Rakennuksen kokonaislämpöhäviötä rajoitetaan edellä esitettyihin seikkoihin liittyvillä määräyksillä ja ohjeilla. Rakennuksen lämpöhäviöt eivät uudisrakennuksessa saa ylittää rakentamismääräysten mukaisesti rakennukselle laskettua vertailulämpöhäviötä. (Tasauslaskentaopas 2012.)

Rakennuksen lämpöhäviön määräystenmukaisuus osoitetaan tasauslaskelmalta, jossa otetaan huomioon rakennusosan säännölliset kylmäsilat ilman rakenteiden välisiä liitoksia. Rakennuksen vaippaan kuuluvan rakennusosan lämmönläpäisykerroin ei saa ylittää arvoa $0,60 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Ikkunan tai oven lämmönläpäisykerroin ei saa ylittää arvoa $1,8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. (D3 Rakennusten energiatehokkuus 2012.)

Kylmäsilat, joita ei ole huomioitu rakenteen lämmönläpäisykerroimessa, otetaan huomioon kokonaisenergiatarkastelussa. Nämä rakennusosien välisten liitosten epäsäännölliset kylmäsilat lasketaan viivamaisten lisäkonduktanssien avulla. (Kurnitski 2012.)

Rakennusosien liitosten viivamaisille lisäkonduktansseille voidaan käyttää rakennusmääräyskokoelmassa D5 2012 annettuja ohjearvoja. Myös tarkempien numeerisesti laskettujen arvojen käyttö on mahdollista. Laskennassa voidaan käyttää käsinlaskentaa tai valmiita laskentaohjelmia. Kylmäsilalaskennassa erityisesti liitosten lähellä olevat rakenteen yksityiskohdat tulisi huomioida mahdollisimman tarkasti. (Viiivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas 2011.)

2.3 Vuotoilma

Rakennuksen vuotoilman määrään vaikuttavat rakennusmateriaalit, läpiviennit ja rakennusosien liitosten tiiveys. Myös rakennuksen muodolla ja sijainnilla voi

olla merkitystä. Ilmatiiveyteen vaikuttavat valinnat tehdäänkin suurelta osin rakennuksen suunnitteluvaiheessa.

Rakennusvaipan osat ja liitokset tulee suunnitella ilmanpitäviksi niin, että niiden läpi tapahtuvat ilmavirtaukset eivät ole haitallisia energiatehokkuudelle, rakenteille tai tilan käyttäjille. Rakennustyön huolellisuuteen sekä läpivientien ja liitosten suunnitteluun tulee kiinnittää erityistä huomiota. (D3 Rakennusten energiatehokkuus 2012.)

Rakennuksen ilmanpitävyydellä on merkitystä rakennuksen vuotoilman mukana siirtyvän lämpöhäviön määrään. Rakennuksen ilmanpitävyydestä kertoo ilmanvuotoluku q_{50} . Suunnitteluratkaisun lämpöhäviöitä laskettaessa voidaan ilmanvuotolukuna käyttää ilman erillisselvityksiä arvoa $4,0 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$. Mikäli käytetään tätä pienempää ilmanvuotolukua, tulee ilmanpitävyys osoittaa jälkikäteen tehtävällä mittauksella tai muulla menettelyllä. (Tasauslaskentaopas 2012.)

Rakennusvaipan ilmanpitävyydelle on aikaisemmin käytetty ilmanvuotolukua n_{50} (1/h), joka on määritetty rakennuksen tilavuutta kohti. Uudessa 1.7.2012 voimaan tulleissa määräyksissä on siirrytty rakennusvaipan pinta-alaa kohti määritettävän q_{50} -luvun käyttöön. Pientalojen osalta ovat yleensä molempien lukujen arvot riittävällä tarkkuudella samansuuruisia. (Tekninen liite 28.3.2011.)

Mittauksella tehtävä rakennuksen ilmanpitävyyden osoittaminen perustuu standardiin SFS-EN 13829.

2.4 Lämpö- ja kosteusvirrat rakenteessa

Lämpöenergia voi siirtyä johtumalla, konvektiolla tai säteilyllä. Lämpöenergian siirtyminen johtumalla tapahtuu kiinteän aineen välityksellä korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Rakennusosan läpi johtumalla siirtyvän lämpöenergian määrään vaikuttaa muun muassa materiaalin lämmönjohtavuus. Konvektiossa lämpöenergia siirtyy virtaavan aineen mukana. Yleensä rakennusfysiikassa tutkitaan ilman konvektiota. Rakennusosan sisäinen konvektio voi muodostua huokoiseen eristekerrokseen johtuen eristekerroksen ulko- ja sisäpintojen läm-

pötilaeroista. Konvektiota voi tapahtua myös epätiivisiin tai huokoisen julkisivupinnan läpi rakenteeseen sekä sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron vaikutuksesta rakenteen läpi, kun sisäpinnan ilmansulku ei ole riittävän tiivis. Säteilyllä lämpöenergia siirtyy kahden eri lämpötilassa olevan pinnan välillä sähkömagneettisina aaltoina. Kappale säteilee lämpöenergiaa ympäristöönsä, kun sen lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella. (RIL 255-2010 / luku 4 luonnosversio.)

Kosteus siirtyy rakenteiden läpi yleensä vesihöyryn diffuusiolla sekä konvektion vaikutuksesta. Rakenteiden sisäinen konvektio on suurempi paksuilla ja hyvin ilmaa läpäisevillä eristekerroksilla. Tiiviin rakennuksen ilmanvaihdon on oltava oikein säädetty, jolla ehkäistään paine-erojen aiheuttama haitallinen kosteuden siirtyminen rakenteeseen. (TRT/1706/2008.)

Diffuusiossa vesihöyryn siirtyminen tapahtuu korkeammasta pitoisuudesta matalampaan. Rakenteeseen siirtyvän kosteuden määrään vaikuttaa materiaalin vesihöyrynläpäisevyys. Konvektiossa kosteus siirtyy ilman mukana kuten lämpöenergiakin. Ilman vesihöyrynpitoisuuden saavuttaessa kyllästyskosteuspitoisuuden voi kosteus kondensoitua rakenteeseen. (RIL 255-2010 / luku 6 luonnosversio.)

3 Ulkovaipan rakennusosat

Rakennuksen energiatehokkuuteen vaikuttavat muun muassa rakennusosien lämmöneristävyys, tiiveys, kylmäsilat ja rakenteiden massiivisuus. Rakennusosat koostuvat eri rakennustarvikkeiden ja kiinnikkeiden muodostamasta kokonaisuudesta. Rakennusosat yhdessä liitoksineen muodostavat rakennuksen lämmön- ja ilmanpitävän vaipan.

Passiivitalossa erittäin tehokkaasti eristetty rakennuksen ulkovaippa ja ilmanvaihdon lämmöntalteenotto mahdollistavat yksinkertaiset tilojen lämmönjakojärjestelmät. Rakennusvaipan toteutuksen kriittisiä teknisiä laatutekijöitä ovat

lämmöneristysten toiminta, materiaalien kosteus prosessin aikana, rakennusvaipan tiiveys, rakenteiden riittävä tuuletus ja kosteudenhallinta suunnitteluratkaisuissa sekä toteutuksessa. Lisäksi ilmanvaihtojärjestelmän toimivuus ja kestäjän lämpötilojen hallinta ovat oleellisia passiivitalon teknisiä laatutekijöitä. (RIL 249-2009.)

3.1 Betonisandwich-ulkoseinä

Seuraavassa on vertailtu ulkoseinäelementtien rakennevaihtoehtoja lämmöneristeen ominaisuuksien kautta. Rakenteessa käytettävä lämmöneriste vaikuttaa rakenteen kokonaispaksuuteen. Lisäksi lämmöneristeen valinnalla on vaikutuksia rakenteen lämmöneristävyteen, rakennusfysikaaliseen toimintaan, kustannuksiin sekä valmistus- ja kuljetustoimintoihin.

Ulkoseinäelementtien lämmönläpäisykertoimien laskenta on tehty C4 lämmöneristys 2012 luonnoksen mukaisesti. Lämmönläpäisykertoimen korjaustekijät sekä korjattu lämmönläpäisykerroin (U_c) on määritelty standardin EN ISO 6946 mukaan käyttämällä Dof Technin laskentaohjelmaa. Lämmöneristemateriaalin vaikutuksia rakennepaksuuksiin lämmöneristävyystavoitteen saavuttamiseksi on vertailtu valituilla levyeristemateriaaleilla. Valitut eristeet ovat mineraalivilla, polystyreeni (EPS) ja polyuretaani (PU).

3.1.1 Eristemateriaalin vaikutus U-arvolaskentaan

Betonisandwich-elementissä materiaalikerrokset sijaitsevat lämpövirran suuntaan nähden peräkkäin. Rakennusosan kokonaislämmönvastus (R_T) muodostuu tällöin C4-ohjeista annetun luonnoksen mukaisesti seinäelementin pintavastusten ja ainekerrosten summasta. Rakennusosan lämmönläpäisykerroin on kokonaislämmönvastuksen käänteisluku ($1/R_T$).

Ohjeen C4 2012 mukaisesti lasketussa korjatussa lämmönläpäisykertoimessa huomioidaan ulkoseinän ilmarakojen ja mekaanisten kiinnikkeiden aiheuttamat lämmönläpäisykertoimen heikennykset korjaustekijöillä. Eristekerroksessa ei saa myöskään tapahtua haitallista määrää luonnollista konvektiota. Laskemalla

muunnettu Rayleighin luku, voidaan tarkistaa, tarvitaanko luonnollisen konvektion estämiseen erityistoimenpiteitä. Laskennalla saatu arvo ei saa ylittää C4 2012 -ohjeessa ulkoseinälle annettua raja-arvoa $Ra_m = 2,5$.

Mineraalivillaeristeissä käytetään elementin ulkokuorta vasten olevassa eristekerroksessa tuuletusuria, joiden tehtävä on varmistaa rakenteen kuivumiskyky. Rakennusosa määritellään C4 2012 -ohjeessa lievästi tuulettuvana rakenteena, kun ulkoilmaan rajoittuvien tuuletusaukkojen määrä on välillä 5 - 15 cm²/m. Käytettäessä elementin eristeratkaisuna muovipohjaisia eristeitä ei rakenteessa yleensä käytetä tuuletusuria. Muovipohjaisilla eristeratkaisuilla toteutettu BSW-elementti luokitellaan tällöin tuulettamattomaksi rakenteeksi. Muovipohjaisten eristeiden väliset saumat ja liitoskohdat tiivistetään vaahdottamalla, jolloin levyjen saumat ja ansaiden kohdat oletetaan laskennassa tiiviiksi. Tämän vuoksi laskelmissa PU- ja EPS-eristeiden osalta ilmarakojen heikennystä ei oteta huomioon.

Ulkoseinän lämmönläpäisykertoimen laskentaan tuuletusurituksella on vaikutusta rakenteen pintavastuksen osalta. Lievästi tuulettuvassa rakenteessa huomioidaan laskelmissa sisä- ja ulkopinnan lämmönvastuksesta puolet verrattuna tuulettamattomaan seinärakenteeseen. (Hakkarainen & Vinha 2010.)

3.1.2 Ilmarakojen vaikutus lämmöneristävyteen

Eristekerroksessa olevien ilmarakojen vaikutus rakennusosan lämmöneristävyteen C4-ohjeen luonnoksessa huomioidaan korjaustason mukaan. Korjaustason valintaan vaikuttaa lämmöneristeen sijainti ja asennustekniikka rakennusosassa.

Mineraalivillaeristeinen betonisandwich-seinä kuuluu korjaustasoon 1. Eristekerroksen ulkopinnassa oleva uritus muodostaa mineraalivillaeristeisessä seinässä ulkokuoren ja eristekerroksen väliin ilmaonkaloita. Muovipohjaisilla eristeillä seinä kuuluu korjaustasoon 0, silloin kun saumat on vaahdotettu ja eristekerroksessa ei ole tuuletusuria.

Edellä esitetyn perusteella muovipohjaisissa eristeissä ei ilmaraoista johtuvaa korjaustekijää tarvitse huomioida. Vastaavasti mineraalivillaeristeiden tapauksessa ilmarakojen korjaustekijäkerroin on korjaustason 1 mukaisesti 0,01 W/m²K.

3.1.3 Kylmäsiltojen vaikutus lämmöneristävyyteen

Mekaanisista kiinnikkeistä aiheutuva kylmäsilta otetaan huomioon korjatun lämmönläpäisykerroimen laskennassa. Korjaustekijä muodostuu käytettävän ansaan mukaan. Vaikutus riippuu ansaan paksuudesta, tyypistä, määrästä ja eristeen paksuudesta elementissä.

Jos käytetään diagonaaliansasta, lämpövirralla on kuljettavanaan seinän läpi pistoansasta pitempi matka, joten myös sen kylmäsiltojen pistemäinen lisäkonduktanssi on pistoansasta pienempi. Elementtien nostolenkit, jotka on sidottu ulko- ja sisäkuoreen, alentavat seinän sisäpinnan lämpötilaa, jolloin lämpövirta huoneesta seinään lisääntyy. Nostolenkin aiheuttamaa pistemäistä lisäkonduktanssia voidaan pienentää katkaisemalla nostolenkki lämmöneristeen kohdalla. (VTT-R-07901-11 2011.)

Ulkonurkan kylmäsiltojen viivamainen lisäkonduktanssi suurenee sisäkuorta paksunettaessa ja eristeen lämmönjohtavuuden kasvaessa. Nurkassa käytettävillä vaijerilenkeillä ei sen sijaan ole juurikaan vaikutusta. Sisänurkassa viivamainen lisäkonduktanssi on negatiivinen, jolloin sisänurkka kumoaa ulkonurkan kylmäsiltojen vaikutusta. (VTT-R-07901-11 2011.)

3.1.4 Ulkoseinän lämmöneristävyys

Työssä asetetun lämmöneristävyyden tavoitetasoa täyttämiseksi tarvittavat eriste-paksuudet eristemateriaaleille on esitetty taulukossa 2. Laskelmat on tehty edellä esitettyjen laskentaperusteiden ja seuraavien lähtötietojen perusteella:

- Sisäkuori 120 mm ja ulkokuori 80 mm, betoni $\lambda_d = 1,65$ W/mK
- Diagonaaliansas (5,5 mm) k 600 mm, teräs $\lambda_d = 17$ W/mK

Eriste	$\lambda_D = \lambda_d$	Eriste d	U	korjaustekijät		U_c
		(mm)	(W/m ² K)	Ansaat ΔU_f	Ilmaraot ΔU_g	
Mineraalivilla (tuuletusurat)	0,035	490	0,07	0,0054	0,01	0,09
EPS (vaahdotetut saumat)	0,031	380	0,08	0,0070	0	0,09
PU (vaahdotetut saumat)	0,024	290	0,08	0,0089	0	0,09

Taulukko 2. Passiivitaloelementin eristevertailu

Haitallisen luonnollisen konvektion estämiseksi mineraalivillan ilmanläpäisevyys saa taulukon eristepaksuudella olla enintään $10,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m s Pa})$, jolloin Muunnettu Rayleighin luku on $< 2,5$. Muussa tapauksessa eristekerroksen luonnollista konvektiota on pienennettävä rakenteellisin keinoin.

Diagonaaliansaasta aiheutuvan korjaustekijän arvot vaihtelevat hieman eristepaksuuden ja ansaan pituuden mukaan, mutta pyöristyssääntöjen vuoksi kaikissa rakenteissa korjatuksi lämmönläpäisykertoimeksi tulee $0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Frame-hankkeen tuloksissa betonisandwich-ulkoseinäelementin lämmöneristepaksuuden kasvaminen ei muuta oleellisesti eristeen ulkopinnan ominaisuuksia. Alkalinen betoni suojaa rakennetta homeenkasvulta vaikka lämmöneristepaksuuden kasvattaminen pidentääkin homeen kasvulle otollista aikaa (Vinha 2011).

Eristepaksuuden kasvattaminen hidastaa sisäkuoren pinnoituskuivuuden saavuttamista erityisesti solumuovipohjaisilla eristemateriaaleilla. Pinnoituskuivuus tulisi varmistaa mineraalivillaeristeisissä seinissä $0,2 \cdot d$ ja solumuovieristeisissä seinissä $0,4 \cdot d$ sisäkuoren syvyydeltä, kun d =sisäkuoren paksuus. (Vinha 2011.)

3.2 Alapohja

Rakennuksen alapohja voi olla maanvarainen tai tuulettuva alapohjaratkaisu. Rakenne muodostuu lattian pintamateriaalista, alus- tai kantavasta rakenteesta, eristeistä, tuuletustilasta tai maatäytöistä sekä perusmaasta. Rakennukseen

toteutettavan alapohjaratkaisun valintaan vaikuttavat oleellisesti tontin muodot, kuormat, perusmaa sekä talon muut rakenneratkaisut.

Tässä työssä käsitellään alapohjaratkaisuja, joissa lattian kantavan ja alusrakenteen muodostavat kivipohjaiset rakennusmateriaalit.

3.2.1 Maanvarainen alapohja

Passiivitason mukaisesti eristetyin maanvaraisen alapohjan eristekerroksen paksuus vaihtelee yleensä 250 – 350 mm:n välillä. Eristepaksuuteen vaikuttaa lämmöneristeen ominaisuudet, perusmaan lämmönvastus sekä sokkelin lämmöneristävyys.

Yksinkertaistetulla laskentakaavalla $U=(1/R_T)*0,9$ voidaan laskea maanvaraisen alapohjan lämmönläpäisykerroin. Kaavassa oleva kerroin 0,9 ottaa huomioon maan lämmönvastuksen (C4 lämmöneristys 2012).

Alapohjan betonilaatan paksuudella 100 mm sekä lämmöneristeellä, jonka lämmönjohtavuus on $0,035 \text{ W / (m K)}$, on kaavan perusteella tarvittava eristeen paksuus 341 mm, jotta työssä asetettu U-arvon tavoitetaso täyttyy. Valittu eristeen lämmönjohtavuus vastaa C4 lämmöneristys 2012 -ohjeiden luonnoksessa grafiittia sisältäville EPS-eristeille annettua lämmönjohtavuuden arvoa.

Paksujen eristekerrosten vuoksi eristeen kokoonpuristuvuus- ja lujuusominaisuuksilla on myös merkitystä. Erityisesti kiviväliseinien, takkojen, portaiden ja muiden rakenteiden paikalliset kuormat voivat aiheuttaa alapohjan painumista.

Matalaenergiarakenteiden toimivuutta arvioivassa TTY:n tutkimusraportissa todetaan lämmöneristeen lisäämisen parantavan maanvaraisen alapohjan kosteusteknistä toimivuutta. Lämmöneristeen lisääminen viilentää maapohjaa, jonka seurauksena maapohjasta ylöspäin tapahtuvan vesihöyryn diffuusion riski pienenee (TRT/1706/2008).

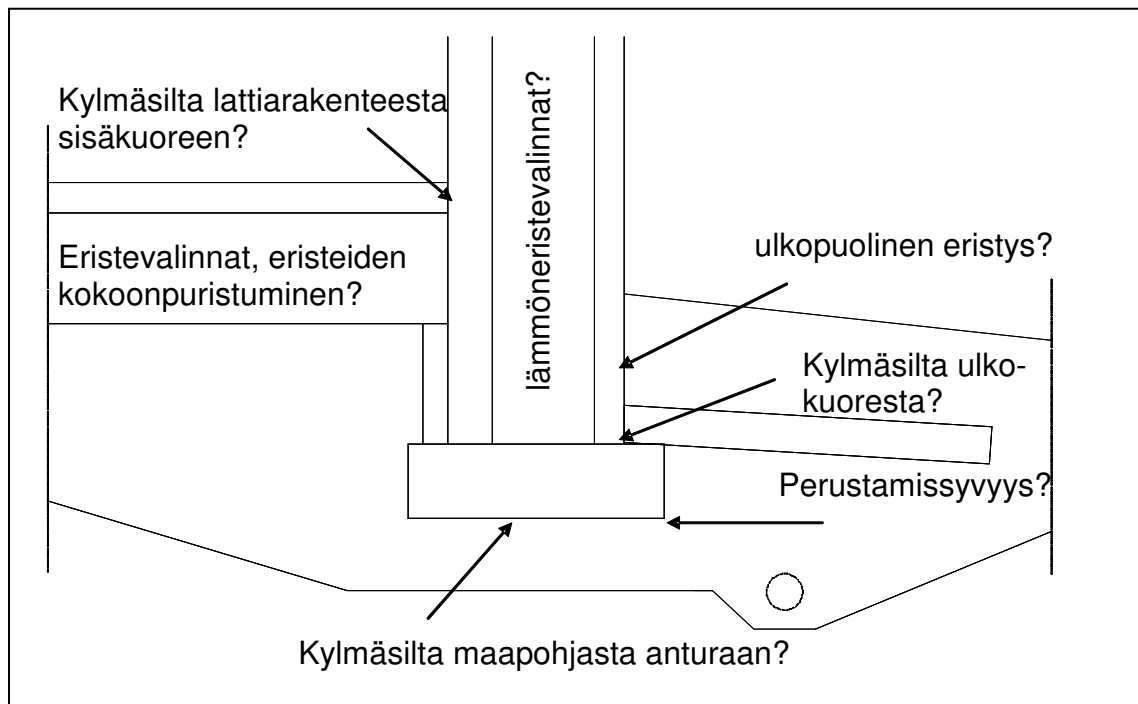
Passiivialapohjaratkaisuissa routasuojauksen tarve lisääntyy verrattuna normitalon alapohjaratkaisuihin, koska alapohjan kautta maapohjaan siirtyvä lämpövirta pienentyy. Riippuen perusmaan ja tontin olosuhteista voi perustamissyvyyden kasvattaminen olla kustannuksiltaan routasuojauksen lisäämistä edullisempi vaihtoehto.

Eps-rakennuseristeteollisuuden VTT:ltä tilaamassa tutkimuksessa maanvastaisen alapohjan routasuojauksesta on tutkittu yhteyttä lattian eristepaksuuden lisäämisen ja routasuojauksen tarpeen välillä käytettäessä EPS-lämmöneristeitä. Betonirakenteisen perusmuurin ulkopuolinen lämmöneristys vähentää tutkimuksen mukaan routasuojauksen tarvetta merkittävästi. Rakenteen toimivuutta voidaan parantaa pienentämällä lisäksi rakenteen kylmäsiltoja ja perusmuurin lämpöhäviöitä suoraan ulkoilmaan. (VTT-R-04025-11 2011.)

Etenkin sokkelirakenteissa kylmäsiltoja tulisi katkaista ja kehittää perustusratkaisuja ilman perusmuuria. Kevytsoraharkot, kevytbetoni sekä solulasi ovat perusmuurien kylmäsiltojen katkaisussa käytettyjä materiaaleja Keski-Euroopassa. (RIL 249-2009.)

Espon Oravanrinteeseen rakenteilla olevien passiivitalojen betonisen sokkelin kylmäsiltojen katkaisussa on käytetty kevytsoraharkkoa lattian eristelinjassa. Kohteeseen tehdyn kylmäsiltojen tarkastelun perusteella ratkaisu pienentää oleellisesti sokkelin johtumislämpöhäviöitä. (Lylykangas 2012). Rakennuslehdessä 20.9.2012 esiteltiin kohdetta saksalaiset kriteerit täyttävänä passiivitalona. Artikkelissa olleessa leikkauskuvassa betonisen sokkelielementin sisäkuoressa oli kylmäsiltoja katkaistu kahdella päällekkäisellä kevytsoraharkolla.

Passiivitalon maanvaraisessa alapohjassa ratkaistavia asioita on havainnollistettu kuvassa 1. Passiivirakenteen suunnittelussa yksityiskohdilla, jotka liittyvät kylmäsiltojen poistamiseen, on suuri merkitys.



Kuva 1. Maanvaraisen alapohjarakenteen tekniset kysymykset.

3.2.2 Tuulettuva alapohja

Tuulettuva alapohjarakenne on ilmaa vasten oleva rakenneosa, jossa kantavan alapohjarakenteen alla on tuulettuva ilmatila. Tuulettuvaa alapohjaratkaisua käytetään yleensä tonteilla, joissa on suuret korkeuserot ja hyvin kantava perusmaa.

Kuten maanvaraisen alapohjan tapauksessa, voidaan myös tuulettuvan alapohjan lämmönläpäisykerroin laskea yksinkertaistetulla laskentatavalla. Laskentatapa voidaan käyttää, kun tuuletusaukkojen määrä ei ylitä 8 promillea alapohjan pinta-alasta. Laskentatavassa ryömintätilan alapuolinen maan lämmönvastus ja ryömintätilan ulkoilmaa korkeampi lämpötila huomioidaan U-arvon korjauskertoimella 0,9. (C4 lämmöneristys 2012.)

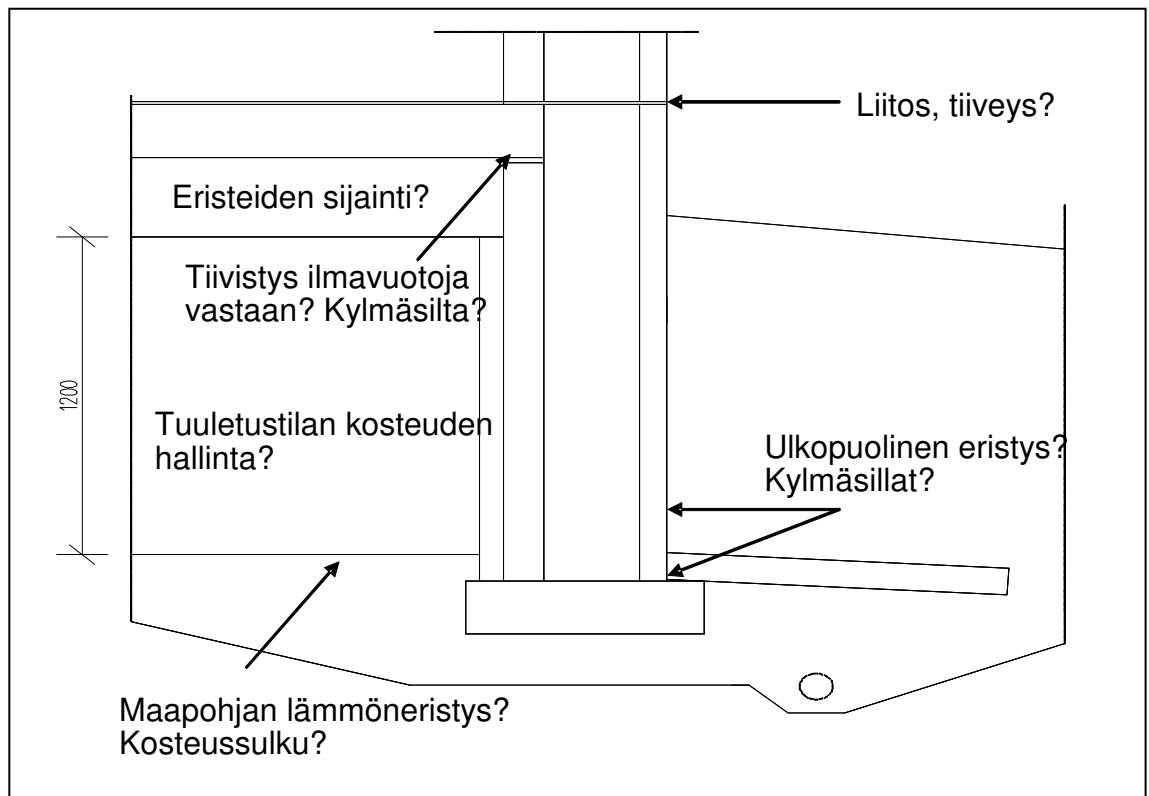
Kun rakenteena on kantava ontelolaatta 200 mm ja pintavalu 100 mm, muodostuu lämmönläpäisykerroimen tavoitteen mukaiseksi eristepaksuudeksi 337 mm, kun eristeen lämmönjohtavuus on 0,035 W / (m K).

Lämmöneristeen lisääminen lattiarakenteeseen kasvattaa kosteusongelmien riskiä tuulettuvissa alapohjissa. Mikrobikasvustolle otollinen vuosittainen ajanjakso ryömintätilassa pitenee, koska tuuletustila viilentyy lämmöneristeen lisäyksen seurauksena. Maaperän kosteusolosuhteiden takia tuulettuva alapohja on erityisen riskialtis homeongelmille ja lahottajasienille. Tuulettuvan alapohjan hyvä ilmantiiveys on tärkeää epäpuhtauksien leviämisen estämiseksi sisätiloihin. (TRT/1706/2008.)

VTT on matalaenergiarakenteita käsittelevässä lausunnossaan todennut riittävän kosteussuojauksen ja lämmöneristämisen etenkin rakennuksen reuna-alueilla mahdollisesti estävän mikrobikasvustolle otollisten jaksojen pitenemistä. Kosteussuojauksena voidaan käyttää tasoitettua maapohjan päällä muovikalvoa. Tarvittaessa asennettava maapohjan lämmöneriste asennetaan muovikalvon päälle levitetyn tasaushiekan päälle. (VTT-S-10816-08.)

Frame-hankkeen tuloksissa, tuulettuvissa alapohjissa ei suositella käytettäväksi yhtenäistä muovikalvoa tuuletustilassa, koska muovikalvon alle muodostuu kosteuden vaikutuksesta home- ja mikrobikasvustolle otolliset olosuhteet. Maapohjan päälle asennettavalla kaksinkertaisella limitetyllä levyeristekerroksella voidaan pienentää vesihöyryn diffuusiota ja kapillaarista nousua maapohjasta. (Lahdensivu, Suonketo, Vinha, Lindberg, Manelius, Kuhno, Saastamoinen, Salminen & Lähdesmäki 2012.)

Passiivitaso tuulettuvissa alapohjissa ratkaistavia teknisiä kysymyksiä on havainnollistettu kuvassa 2. Näitä ovat kosteusteknisen toimivuuden ja ilmantiiveyden lisäksi muun muassa kylmäsiltojen minimoiminen sekä alapohjan eristekerrosten sijainti rakenteessa.

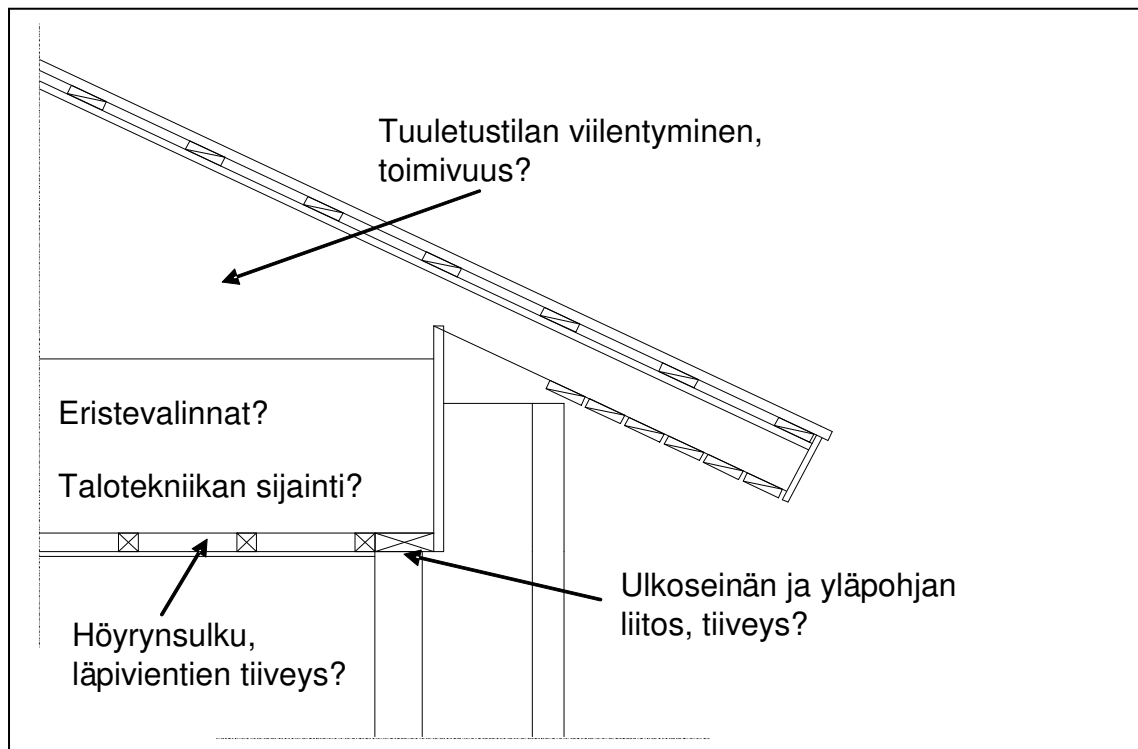


Kuva 2. Tuulettuvan alapohjarakenteen tekniset kysymykset.

3.3 Yläpohja

Yläpohjan kantava rakenne kivitaloissa toteutetaan yleensä ristikkorakenteilla tai kertopuupalkistoilla. Kantavat kattorakenteet kiinnitetään kivrakenteiseen ulkoseinään asennettavaan yläohjauspuuhun kulmarauodoilla. Myös ontelolaattaa yläpohjan kantavana rakenteena käytetään, varsinkin ääneneristävyyttä vaativille alueille rakennettaessa. Kuvassa 3 on esitetty puurakenteisten yläpohjien toteutuksen haasteita.

Yläpohjarakenne sisältää yleensä lämpövirran suuntaan nähden lämmönjohtavuudeltaan erilaisia rinnakkain rakenteessa olevia materiaaleja. Yläpohjan kokonaislämmönvastus on tällöin lämmönvastuksen ylälikiarvon ja alaliikarvon keskiarvo. (C4 lämmöneristys 2012.)



Kuva 3. Tuulettuvan yläpohjan tekniset kysymykset.

Puurakenteisissa yläpohjissa höyrinsulku voidaan toteuttaa käyttämällä tarkoitukseen soveltuvaa kalvoa tai levymäistä rakennetta. Höyrinsulkukalvon limitykseen ja saumojen teippaukseen tulee kiinnittää erityistä huomiota. Jatkoskohtien tiiveys voidaan varmistaa käyttämällä lisäksi puristusliitosta, jossa kalvo puristetaan limityksen kohdalta kahden riman väliin. Käytettäessä levymäisiä höyrinsulkuja tulee saumat vaahdottaa ja teipata vaahdotuksen jälkeen. Teippaus varmistaa sauman pitkäaikaistiiveyden. (Aho & Korpi 2009.)

Ilmanvuotojen osalta Tampereen teknillisen yliopiston tekemässä tutkimuksessa pientalojen ulkoseinän ja yläpohjan liitoksen kautta aiheutuu 37 % ilmanvuodoista. Myös yläpohjarakenteella on tutkimuksen mukaan merkitystä talojen ilmanvuotolukuihin. Mittauksissa ontelolaattarakenteisissa yläpohjissa saatiin puurakenteisia yläpohjia pienempiä ilmanvuotolukuja. (Vinha, Korpi, Kalamees, Jokisalo, Eskola, Palonen, Kurnitski, Aho, Salminen, Salminen & Keto 2009.)

Lämmöneristepaksuuden lisääntyessä yläpohjan tuuletustila viilenee ja suhteellinen kosteus nousee. Tämän seurauksena rakenteen kosteustekninen toimi-

vuus heikkenee. Rakenteen kosteusteknisen toimivuuden kannalta tiiveys ja sisätilan ilmanvaihdon säädöt ovat tärkeitä. (TRT/1706/2008.)

Yläpohjan lämmöneristyksen kasvattaminen ja ilmastonmuutos lisäävät homeenkasvun riskiä yläpohjassa. Homeindeksin arvoon vaikuttaa kuitenkin oleellisesti materiaalin homehtumisherkkyys. Hyvin vesihöyryä läpäisevällä aluskatteella saavutetaan tiiviimpää aluskatetta pienemmät homeindeksin arvot. (Laukarinen 2011.)

3.4 Ikkunat ja ovet

Kivirakenteisissa passiivitaloissa ikkunoiden kiinnitysratkaisut ja liitoksen tiiveyden varmistaminen ovat keskeisiä suunnittelussa ratkaistavia seikkoja. Näiden lisäksi ikkunan sijainnilla seinärakenteessa on merkitystä ikkunan toimivuuteen.

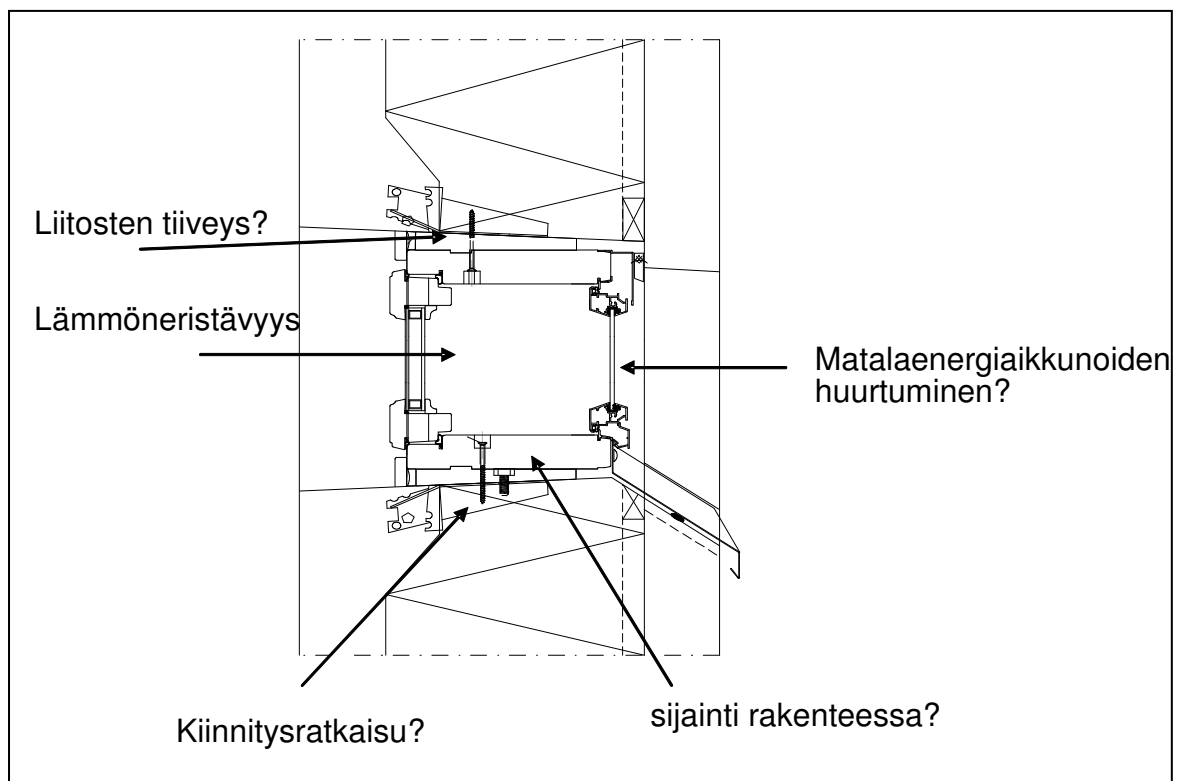
Yleensä ikkunat ja ovet kiinnitetään seinärakenteeseen eristeen kohdalle. Betonisandwich-elementeissä käytetään kiinnityksessä elementin sisäkuoreen asennettavia karmikenkiä. Harkkorakenteisissa seinissä kiinnityksessä käytetään yleisesti apukarmia, jolle lovetaan tila eristeeseen työmaalla. Harkkorakenteisiin on myös ikkunatoimittajat kehittäneet ratkaisuja, joilla kiinnitys voidaan tehdä suoraan eristeeseen ilman apukarmeja.

Puisten apukarmien asennusaikainen kosteus on yleensä suuri, mikä aiheuttaa ongelmia ikkuna- ja oviaasennuksissa. Asennuksen jälkeen tapahtuvasta apukarmin kuivumisesta aiheutuvat muodonmuutokset voivat vaurioittaa ikkuna- ja ovirakenteita. (Suutarinen 2008.)

Ikkunarakenteella on vaikutusta liitoksen viivamaisen kylmäsillan lisäkonduktanssiin, koska ikkunan välitilan lämpötila riippuu muun muassa sisä- ja ulkopuitteessa käytettävistä lasituksista. Seinärakenteesta siirtyy karmin läpi lämpöä ikkunarakenteen välitilaan, ja mitä kylmempi välitila on, sitä suurempi lisäkonduktanssin arvoksi saadaan. MSE-ikkunan apukarmikiinnityksen viivamainen lisäkonduktanssi on karmikenkä kiinnitystä selvästi suurempi. (VTT-R-07901-11 2011.)

Tampereen teknillisen yliopiston tutkimuksen mukaan ikkunat ja ovet sekä näiden liitokset ulkoseinään ovat tyypillisiä ilmavuotojen aiheuttajia muodostaen 31 % pientalon ilmavuodoista (Vinha ym. 2009).

Ikkunan tulisi sijaita passiivitalon seinässä lämmöneristeen kohdalla, mahdollisimman lähellä seinän sisäpintaa. Ikkunat tulisi valita 2-puitteisina ja mahdollisimman kapealla karmisyvyydellä. Nämä seikat vaikuttavat ikkunan lasiaukon reuna-alueiden lämpötiloihin ja vähentävät kosteuden tiivistymisen riskiä ikkunoissa. (Hemmilä 2012.)



Kuva 4. Ikkuna- ja oviliitoksen tekniset kysymykset.

3.5 Muut rakennusosat ja liitokset

Ulkovaipan rakennusosien liitosten lisäksi, on rakennuksessa erilaisia ulkovaipan läpäiseviä liitoksia, kuten hormit ja talotekniikan läpiviennit. Näiden lisäksi, on myös sisäisten ja ulkoisten rakennusosien välisiä liitoksia, kuten välipohjien sekä väliseinien liittyminen ulkovaipan rakennusosiin.

Muilla kuin ulkovaipan rakennusosien liitoksille, ei tässä passiivitalokonseptissa esitetä ratkaisuja. Saatavilla on paljon erilaisia tuotteita ja valmistajien laatimia ohjeita tiiveyden varmistamiseksi. Liitosten ja läpivientien tiivistämiseen tarkoitettuja tuotteita ovat muun muassa tiivistyskankaat ja elastiset saumavaahdot. Liitosten tiivistämisessä tulee noudattaa käytettävän tiivistysmateriaalin ja tiivistettävän tuotteen valmistajan laatimia ohjeita. Yksityiskohtien tiivistämisen ohjeistus tulee liittää myös passiivitalon työohjeisiin.

4 Tulokset

Seuraavassa on esitetty passiivitalokonseptin suunnitteluratkaisut rakennusosittain. Suunnitteluratkaisut toimivat tämän passiivitalokonseptin tyyppirakenteina, joiden pohjalta voidaan laatia tarvittavat työmaan ja valmistuksen ohjeistukset. Rakennusratkaisujen käyttöä ohjaa passiivitalokonseptille laadittu tarkistuslista sekä asennuksen ja käyttövaiheen ohjeistus rakennusosien toimivuuteen vaikuttavista tekijöistä.

4.1 Ulkoseinä

Ulkoseinän lämmöneristävyystavoitteen osalta on esitetty luvussa 3.1.4 U-arvolaskelmat, joiden perusteella on määriteltävä tarvittavat ainepaksuudet erilaisille eristemateriaaleille. Seinässä käytettävä eristemateriaali vaikuttaa rakenteen rakennusfysikaaliseen toimintaan, jota tutkittiin kosteussuunnitteluohjelman Wufi 5.1 avulla. Wufi-laskennassa on otettu mukaan PU-, EPS- ja mineraalivillieristemateriaalien lisäksi myös niin sanotut sekaeristerakenteet, joiden tarkoituksena on vahvistaa johtopäätöksiä eristemateriaalin vaikutuksesta rakenteen rakennusfysikaaliseen toimintaan. Eristeiden materiaalitietoina on laskennassa käytetty valmistajien ilmoittamia arvoja. Betonin materiaalitietoina on käytetty wufi-ohjelman materiaalitietokantaa. Betonin vesisementtisuhde laskelmissa on 0,5 ja alkukosteus 95 % RH.

Työssä tutkittiin 6 eri ulkoseinävaihtoehtoa. Kaikki tutkitut ulkoseinävaihtoehdot täyttävät työssä ulkoseinälle asetetun lämmöneristävyysvaatimuksen ($U=0,09$). Ulkoseinän betoninen sisäkuori on wufi-laskennassa 120 mm ja ulkokuori 80 mm, jotka ovat kaikissa ulkoseinävaihtoehtoissa vakioita. Tutkitut eristemateriaalivaihtoehdot ja niiden yhdistelmät ovat:

US1 = Polyuretaani (PU) 290 mm

US2 = Polystyreeni (EPS) 380 mm

US3 = Mineraalivilla 490 mm

US4 = PU 100 mm + EPS 250 mm

US5 = EPS 100 mm + mineraalivilla 350 mm

US6 = PU 100 mm + mineraalivilla 300 mm

Laskenta ulkoseinien osalta on tehty 3 vuoden ajalta eteläseinälle, paikkakuntana Jyväskylä. Aloitusaikajankohdaksi on valittu lokakuun alku, joka vastaa normaalia tilannetta rakentamisessa. Usein omakotitalorakentamisessa on talon runkovaihe tuolloin tehty ja rakennustyömaalla aloitettu lämmitys- ja mahdolliset kuivatustoimenpiteet. Wufi-laskennan lähtötiedot ja tulokset on esitetty liitteessä 1.

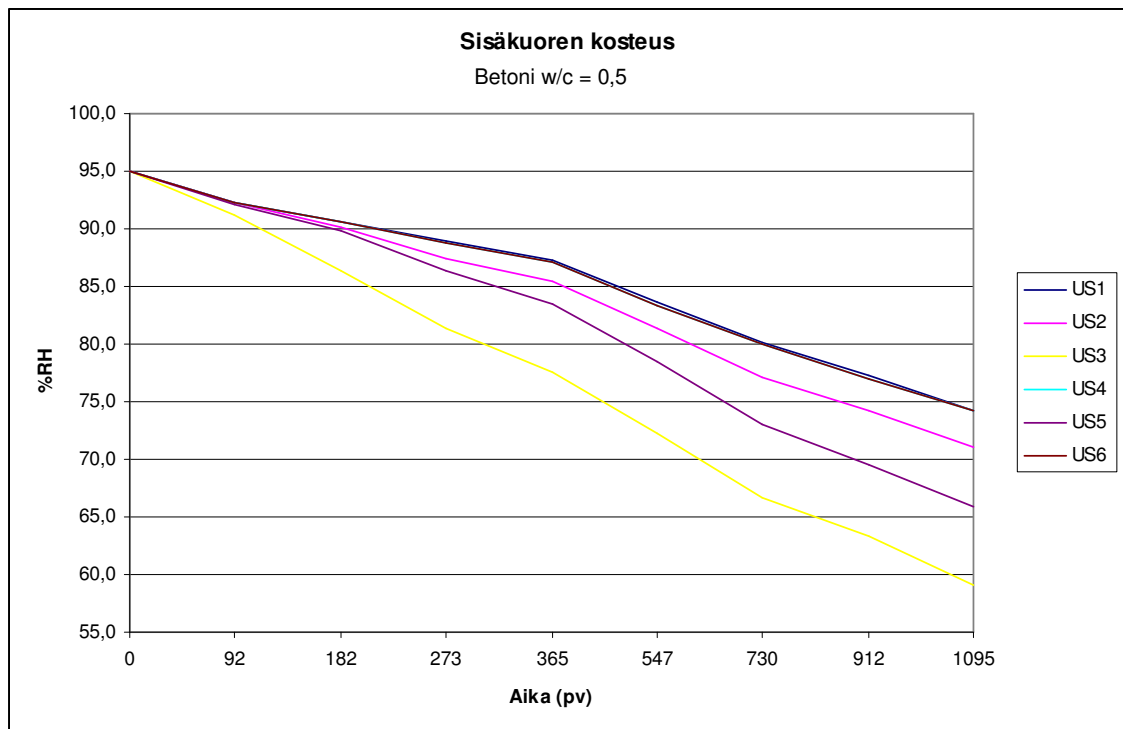
4.1.1 Sisäkuoren toiminta

Betonisen sisäkuoren kosteusjakautumien perusteella on yhden vuoden laskenta-aika jaettavissa kahteen jaksoon. Kuivumista tapahtuu syksyn ja talven aikana, kun taas kuivuminen on hidasta tai sitä ei tapahdu ollenkaan kevään ja kesän aikana. Voimakkainta kuivuminen on ensimmäisellä lämmityskaudella, jolloin kuivumisesta aiheutuvat myös suurimmat muodonmuutokset rakenteisiin. Sisäkuoren kosteuspitoisuudet alenevat kuitenkin koko kolmen vuoden tarkasteluajan yllä esitettyjen jaksojen mukaisesti.

Betonisen sisäkuoren kuivumisnopeus on riippuvainen rakenteessa käytettävästä eristemateriaalista, betonilaadusta ja olosuhteista. Polyuretaanieristeisen seinän sisäkuori kuivuu vain sisätiloihin päin, jolloin kuivuminen on hidasta ilman erikoistoimenpiteitä. Myös EPS-eristeisen rakenteen sisäkuoren kuivumi-

nen on hidasta, vaikka sisäkuoren kuivumista tapahtuu jonkin verran myös rakenteen läpi ulospäin. Mineraalivillaeristeisessä seinässä sisäkuoren kuivuminen tapahtuu molempiin suuntiin, joka nopeuttaa kuivumista. Sekaeristerakenteissa sisäkuorta vasten oleva eriste määrittelee sisäkuoren kuivumisnopeuden eikä eristemateriaalin muuttumisella suuren vesihöyryn vastuksen omaavan eristeen jälkeen läpäisevämmäksi eristeeksi ole juuri merkitystä sisäkuoren kuivumisnopeudelle.

Sisäkuoren kuivumista tarkasteltiin 48 millimetrin etäisyydellä sisäpinnasta. Monien seinissä käytettävien pinnoitemateriaalien suhteellisen kosteuden raja-arvo 90 % RH alittuu tarkastelusyvyydellä mineraalivillaeristeisen seinän tapauksessa 125 päivän kuluttua, kun vastaavaan arvoon polyuretaanieristeisen seinän tapauksessa päästään vasta 233 päivän kuluttua. Sisäkuoren kuivuminen eri ulkoseinävaihtoehdoilla syvyydellä $0,4 \cdot d$ (d =sisäkuoren paksuus) on esitetty kaaviossa 1.



Kaavio 1. Sisäkuoren kosteus (Ulkoseinävaihtoehdot on esitetty s.27; US1=PU, US2=EPS, US3=MV, US4=PU+EPS, US5=EPS+MV, US6=PU+MV).

4.1.2 Eristeen toiminta

Eristeen kosteusvaihtelut johtuvat rakenteen kuivumisesta aiheutuvasta sisäisestä kosteusrasituksesta sekä sateen muodostamasta ulkoisesta kosteusrasituksesta. Rakenteen kuivumisen aiheuttama kosteuskuorma vaikuttaa kuitenkin eristeen kosteuteen käytännössä vain mineraalivillan tapauksessa. Eristemateriaalien kosteuspitoisuus on riippuvainen eristeen vesihöyryn läpäisevyydestä. Mitä enemmän eristemateriaali läpäisee vesihöyryä sen voimakkaampia ovat kosteuspitoisuuden vaihtelut myös eristekerroksessa.

Kokonaiskosteuspitoisuus laskee PU- ja EPS-eristeiden tapauksessa hieman laskentajaksolla, pysyen kuitenkin melko vakiona. EPS-eristeen kosteuden vaihtelut ovat suurempia kuin PU-eristeen.

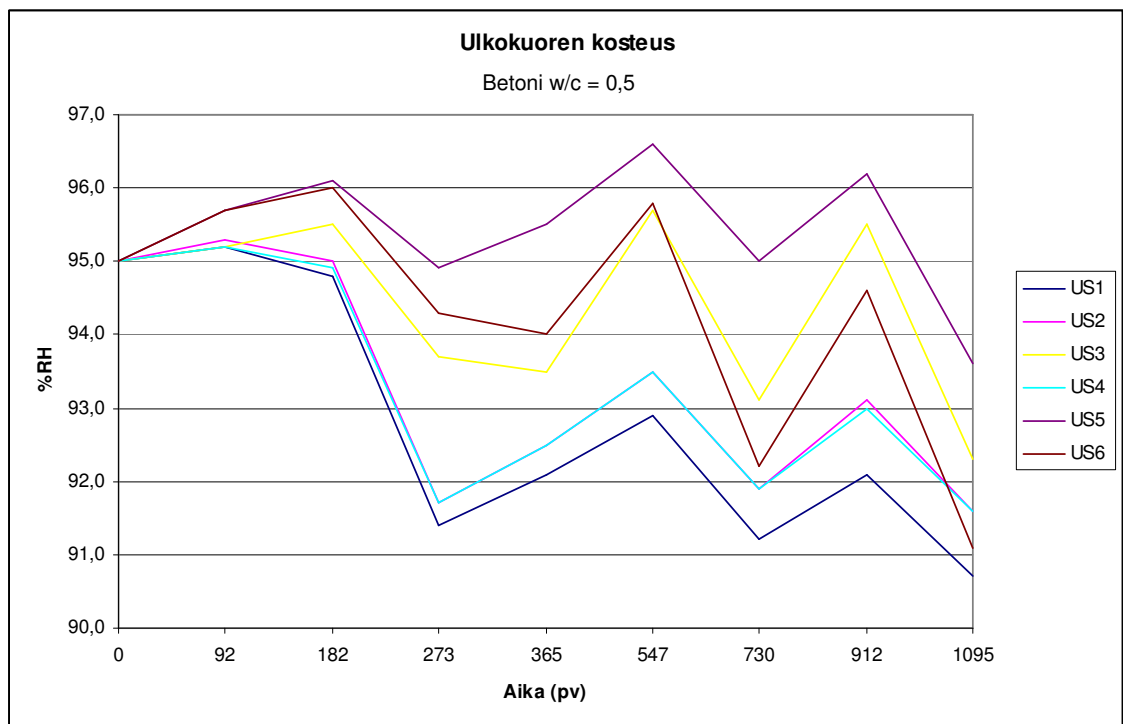
Mineraalivillan kosteuspitoisuus nousee alkuvaiheessa voimakkaasti. Tämä johtuu sisä- ja ulkopuolen yhtäaikaisesta kosteusrasituksesta. Sisäkuoren kuivuminen myös ulospäin lisää mineraalivillaeristeen kosteuspitoisuutta. Alkuvaiheen noin viiden kuukauden kosteuden nousun jälkeen alkaa eristeen kosteuspitoisuus hitaasti laskea noudattaen vuodenaikavaihteluita. Laskennassa ei ole huomioitu mineraalivillassa käytettäviä tuuletusuria, joka todennäköisesti vaikuttaa eristeen kosteuspitoisuuksiin alentavasti.

Kastepistettä ei eristevaihtoehtoilla muodostu eristekerrokseen. Lämpötila eristeen keskivaiheilla pysyy laskentajakson ajan kastepistelämpötilaa korkeampana. Suurin riski kastepisteen muodostumiselle on rakenteissa ulkokuoren sisäpinnassa. Myös eristekerroksen sisä- ja ulkopintalämpötilat ovat eri vaihtoehtoilla lähellä toisiaan, jonka perusteella rakenteiden sisäisen konvektion erot muodostuvat eristemateriaalin ilmanläpäisevyydestä sekä liitosten toteutuksesta. Mineraalivillaa käytettäessä on passiivitaso eristepaksuudella kiinnitettävä huomiota eristeen ilmanläpäisevyyteen tai vähennettävä eristeessä tapahtuvaa luonnollista konvektiota rakenteellisin keinoin.

4.1.3 Ulkokuoren toiminta

Ulkokuoren kosteustekninen toiminta jakautuu vuoden aikana kolmeen jaksoon riippumatta eristemateriaalista. Jaksot ovat kastuminen, kuivuminen ja tasapainojakso. Ulkokuoren kosteuspitoisuus nousee syksyllä ja laskee keväällä. Kesällä ei tapahdu suuria muutoksia ulkokuoren kosteudessa vaan kosteuspitoisuus pysyy melko vakiona lukuun ottamatta lyhyitä sadejaksoja, jotka hetkellisesti kastelevat rakennetta.

Ulkokuoren kosteus on suurin ulkoseinärakenteissa, joissa käytetään mineraalivillaa. Myös kosteuden vaihtelut näillä ratkaisulla ovat muita vaihtoehtoja suurempia. Sekaeristerakenteissa tiiviimpi eristemateriaali sisäpinnassa ei tulosten mukaan vähennä ulkokuoren kosteuksia, jolloin rakenteen sisäpuolisen kosteusrasituksen osuus ulkokuoreen näyttäisi olevan vähäinen. Ulkokuoren kosteus eri rakennevaihtoehdoilla syvyydellä $0,4 \cdot d$ (d =ulkokuoren paksuus) on esitetty kaaviossa 2.

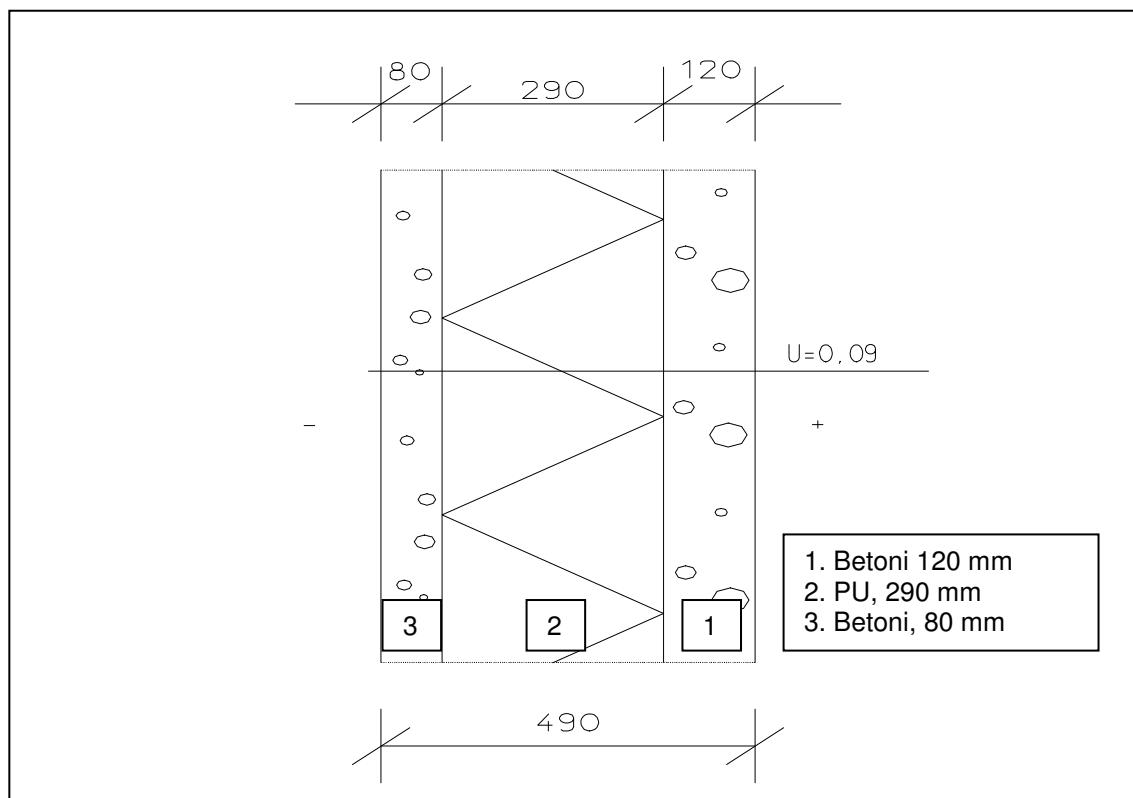


Kaavio 2. Ulkokuoren kosteus (Ulkoseinävaihtoehdot on esitetty s.27; US1=PU, US2=EPS, US3=MV, US4=PU+EPS, US5=EPS+MV, US6=PU+MV).

4.1.4 Yhteenveto

Wufi-laskennan perusteella kaikki tutkitut seinärakennevaihtoehdot ovat lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan kannalta käyttökelpoisia. Tämän vuoksi passiivitason bsw-seinän eristemateriaalivalinnassa ei ensisijaiseksi valintatekijäksi tutkituilla rakenteilla nouse tekniset ominaisuudet. Suurimmat riskit rakenteiden toimivuudelle aiheutuvat materiaalien varastoinnin, tuotannon, logistiikan ja asennuksen mahdollisista epäkohdista, jotka myös määrittelevät eristevalintaa teknisiä ominaisuuksia enemmän. Eristevalinta tulisi tehdä kohdekohtaisten vaatimusten mukaan huomioiden lämmöneristävyys tavoitteet ja kustannukset.

Tässä passiivitalokonseptissa eristemateriaalina käytetään polyuretaanieristettä. Tällöin asetettu lämmöneristävyysvaatimus saavutetaan kohtuullisella rakennekaksuudella ja muut konseptiin kuuluvat rakenneosat ja liitokset on mahdollista toteuttaa soveltaen vakioratkaisuja. Ilmanläpäisevyydeltään tiiviissä eristekerroksessa ei myöskään synny haitallista konvektiota passiivitason eristepaksuuksilla. Polyuretaanieristeisen bsw-elementin sisäkuoren hidas kuivuminen on huomioitava pinnoitemateriaalin valinnassa ja pinnoitusajankohdan suunnittelussa. Myös nopeammin kuivuvan betonilaadun käytöllä voidaan nopeuttaa sisäkuoren kuivumisaikaa. Kuvassa 5 on esitetty rakenneleikkaus ulkoseinästä.



Kuva 5. Passiivitalokonseptin ulkoseinä.

4.2 Alapohja

Konseptin maanvarainen alapohja on esitetty kuvassa 6. Lämpöhäviöiden pienentämiseksi on betoni-betoniliitokset ja betoni-maatäyttökosketuspinnat katkaistu. Alapohjan ja ulkoseinän liitoksessa viivamaiselle kylmäsilan lisäkonduktanssille ψ_k rakennusmääräyskokoelman osiossa D5 2012 annettu arvo betoni-liitokselle pienenee 37,5 %, kun liitoksessa sokkelielementin sisäkuoren materiaali muutetaan betonista kevytsorabetoniksi.

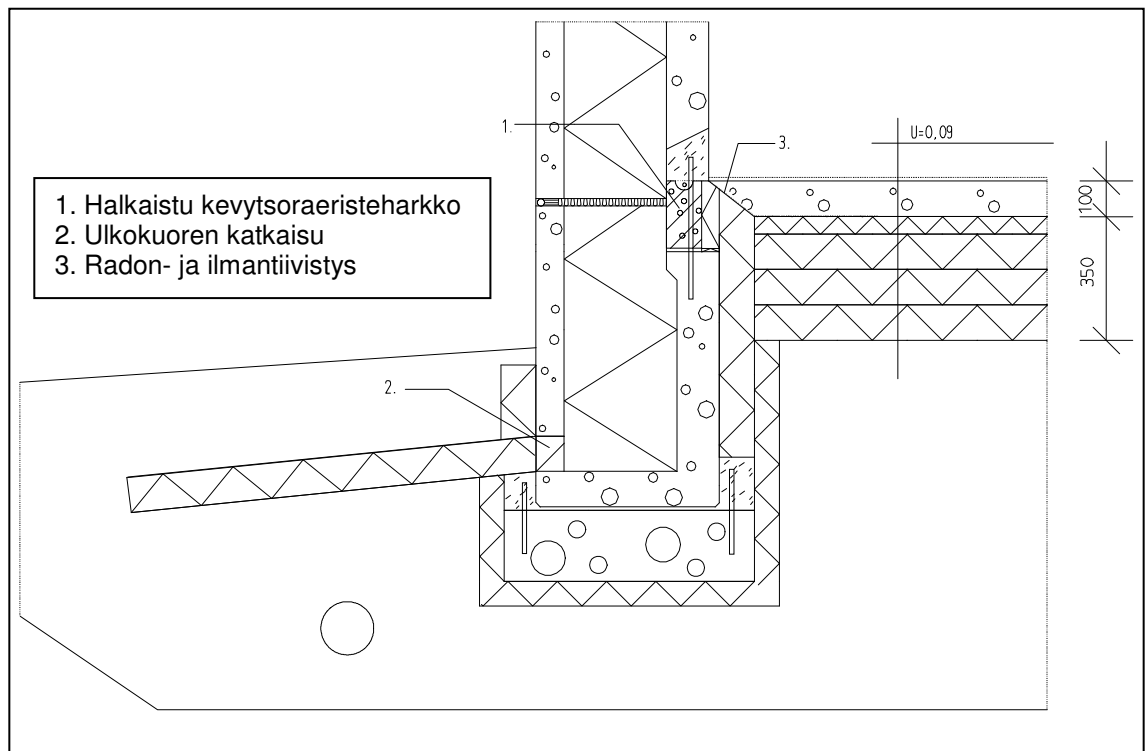
Betoniaineisen perusmuurin sisäkuoren katkaisua kevytsoraharkolla testattiin syksyllä 2011. Tampereen asuntomessuille rakennetun Lakka kivitalo -kohteen valueristeharkon sisäkuoren kylmäsilan katkaisu alapohjan kohdalla tehtiin kahdella päällekkäisellä kevytsoraharkolla. Myös kantavien väliseinien kylmäsilta katkaistiin kohteessa vastaavalla tavalla.

Kevytsoraharkkoja alapohjaliitoksen betonirakenteen kylmäsilan katkaisussa on käytetty myös ainakin rakenteilla olevissa Espoon Oravarinteen passiivitaloissa (Rakennuslehti 20.9.2012, s.12).

Halkaistulla kevytsoraeristeharkolla tehtynä ja sokkelielementin sisäpintaan asennettavan eristelevyn viemisellä kevytsoraharkon yläpintaan saakka katkaistaan kiviaineisten materiaalien kosketuspinnat kokonaan. Lisäksi liitoksen lämmöneristävyys halkaistun lämpöharkon kohdalla on liittyviä rakennusosia parempi.

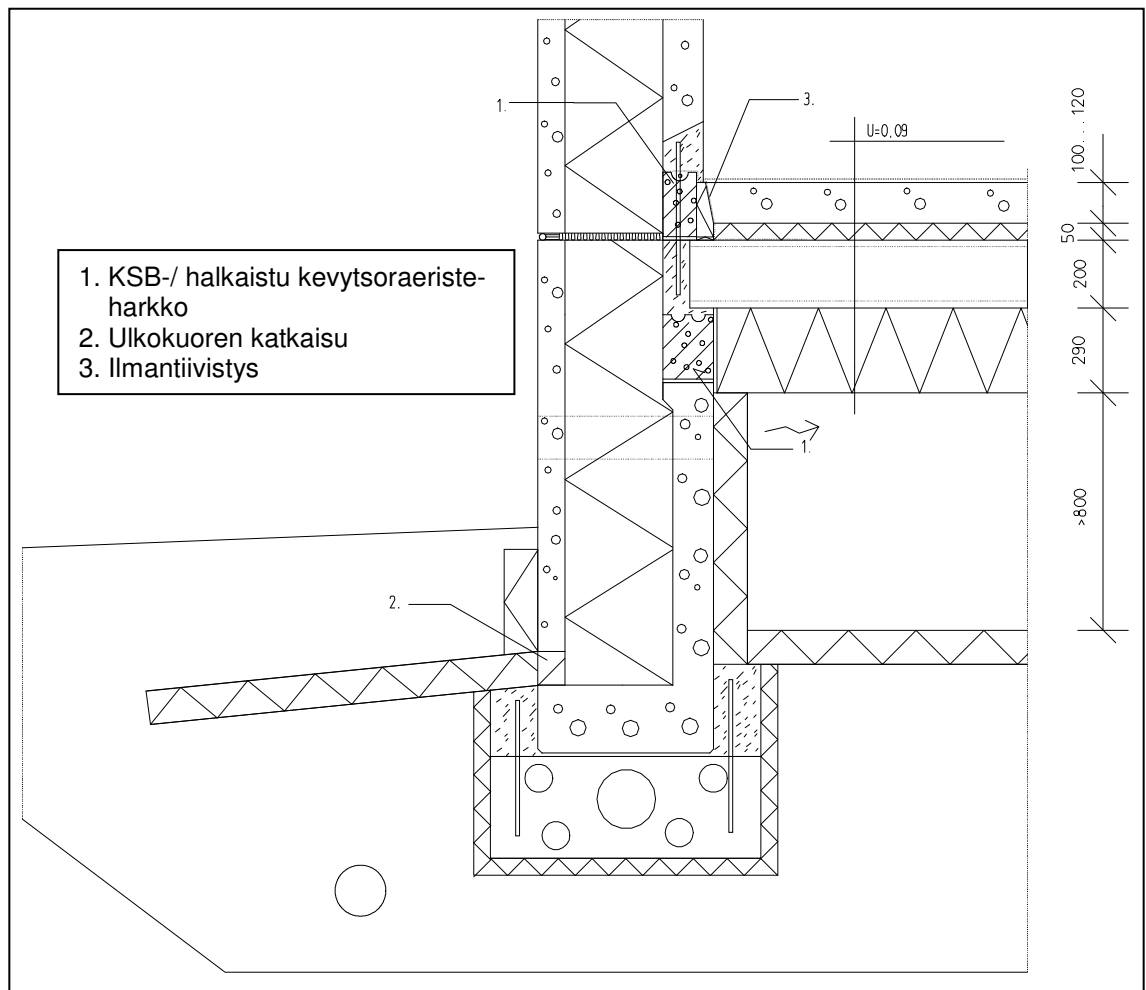
Sokkelielementin lämmöneristeinä käytetään grafiittia sisältävää EPS-eristettä. Sisäpuolelle asennettavan 100 mm:n EPS-eristelevyn kanssa sokkelin lämmöneristävyys ei heikkene ulkoseinäelementtiin verrattuna.

Liitoksen kylmäsilatarkaisun lisäksi vaakaliitos perusmuuriin on porrastettu, mikä parantaa liitoksen ilmantiiveyttä sekä vähentää mahdollisen ulkopuolisen kosteuden siirtymistä alapohjarakenteisiin. Radon- ja ilmantiivistyskaista asennetaan liitoksessa ulkoseinäelementin vaakaliitokseen, josta se viedään alapohjalaatan alle. Sokkelielementin ulkokuori on katkaistu lämmöneristeellä lämpöhäviöiden minimoimiseksi sisäkuoren ja anturan kautta ulkoilmaan. Perustustaso vaikuttaa sokkelin ulkopuolisen lämmöneristämisen tarpeeseen, ja sen mitoittaminen tulee tehdä tapauskohtaisesti tonttiolosuhteiden mukaan. Kohdassa 3.2.1 esitetyllä tavalla laskettu lämmönläpäisykerroin rakenteelle on 0,09 W/m²K.



Kuva 6. Passiivitalokonseptin maanvarainen alapohja.

Tuulettuvan alapohjan suunnitteluratkaisu on toteutettu liitosten osalta samoilla periaatteilla kuin maanvarainen alapohja (kuva 7). Tuulettuvan alapohjan ja ulkoseinän liitoksessa materiaalinuutoksella on maanvaraista alapohjaakin suurempi merkitys. Viivamaisen kylmäsilän lisäkonduktanssin ψ_k arvo pienenee D5 ohjeellisten arvojen mukaan 60,7 %, jos liitoksen kohdalla sisäkuori korvataan kevytsorabetonilla. Alapohjan tuuletustilan kosteusteknisen toimivuuden parantamiseksi, tuuletustilassa käytetään perusmaan päällä kapillaarisora- ja lämmöneristekerrosta. Kapillaarisoran päälle asennetaan ohut tasaushiekkakerros lämmöneristekerroksen asentamista varten. Maapohjan lämmöneristekerros tehdään kahdella levyeristekerroksella saumat limittäen. Alapohjan kantavana rakenteena olevan ontelolaataston saumat tiivistetään ilmavuotoja vastaan ontelolaatan päälle liimattavilla bitumikaistoilla. Alapohjan lämmöneristeet ovat pääosin laatan alapinnassa, jolloin betonirakenteen lämpötila pysyy tuuletustilan lämpötilaa korkeamana ja kosteuden tiivistymisen riski betonipinnoissa pienenee. Kohdassa 3.2.2 esitetyllä tavalla laskettu lämmönläpäisykerroin rakenteelle on 0,09 W/m²K.



Kuva 7. Passiivitalokonseptin tuulettuva alapohja.

Molemmat alapohjaratkaisut ovat sovellettavissa myös pientaloissa paljon käytettäviin muotti- ja valueristeharkkoperustuksiin.

4.3 Yläpohja

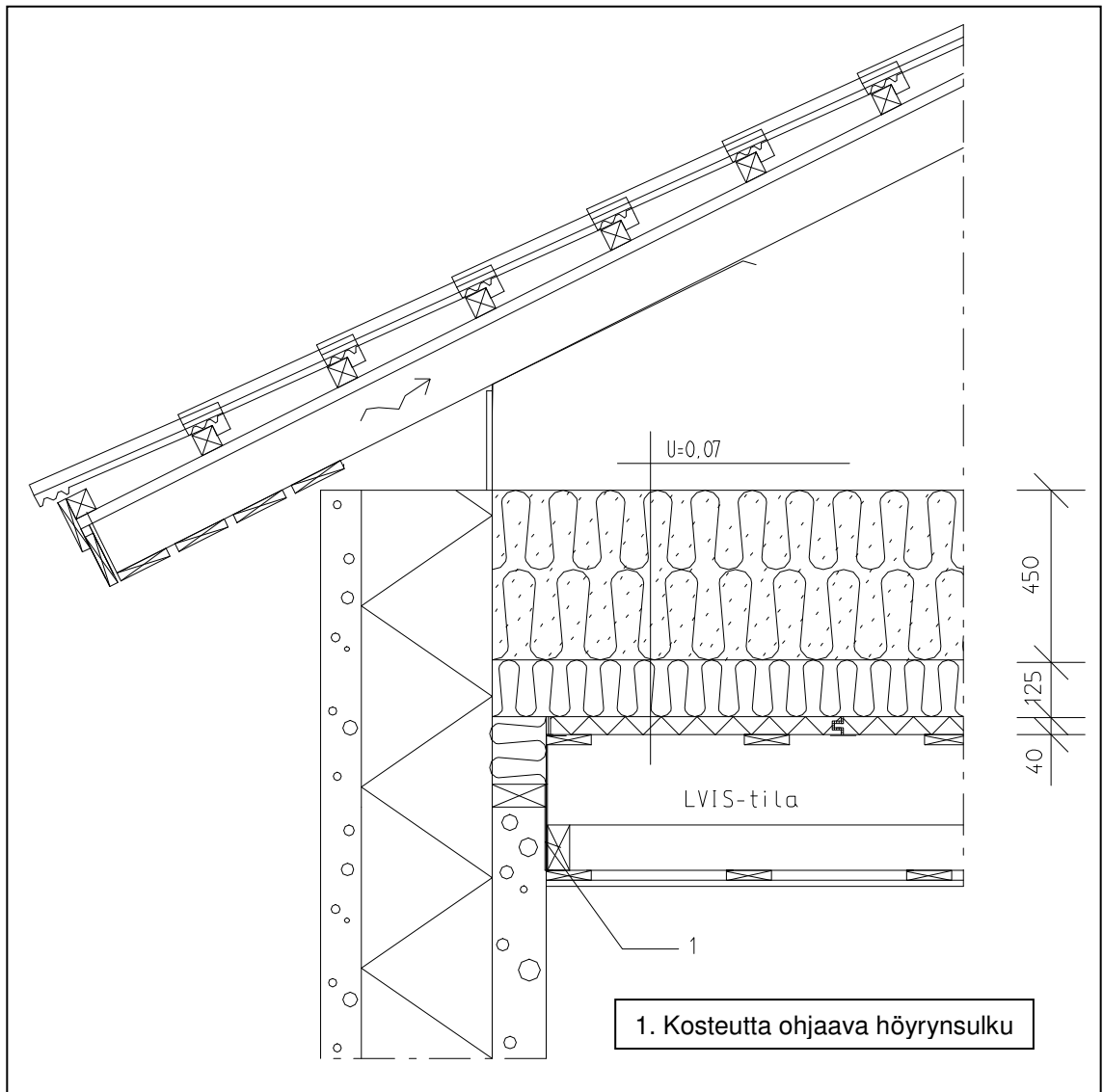
Yleisyytensä takia tässä passiivitalokonseptissa on yläpohja suunniteltu puurakenteisena. Suunnitteluratkaisussa on pyritty poistamaan rakenteelle tyypilliset tiiveysongelmat.

Yläpohjarakenteen u-arvo on $0,07 \text{ W/m}^2\text{K}$ (kuva 8). Lämmönläpäisykerroin on laskettu Puufon internetsivujen ohjelmaversiolla 1.03. Ohjelmalla voidaan laskea SFS-EN ISO 6946 mukaisesti puurakenteen lämmönläpäisykerroin.

Ratkaisussa on kiinnitetty erityistä huomioita yläpohjan ja ulkoseinän liitoksen tiiveyteen sekä läpivienneistä aiheutuvien tiiveysongelmien vähentämiseen. Ristikkorakenteen tukiliitoksen korotus mahdollistaa ulkoseinä-yläpohjaliitoksen saumakohdan yhtenäisen ja ilmatiiviin höyrynsulkurakenteen sekä talotekniikan kuljettamisen alaslaskutilassa höyrynsulun alapuolella. Läpiviennit pystytään pääosin tekemään höyrynsulkua rikkomatta. Höyrynsulkuna yläpohjassa toimii alumiinipintainen polyuretaanilevy. Alaslaskutilan sivuilla höyrynsulkuna käytetään kosteutta ohjaavaa ilmatiivistä höyrynsulkua. Tällöin polyuretaanieristeisen elementtiseinän sisäkuori ja yläohjauspuu eivät ole kahden vesihöyrytiivin kalvon välissä. Höyrynsulkukangas teipataan yläpohjassa polyuretaanilevyn pintaan. Ulkoseinällä liitoksen tiiveys varmistetaan puristusliitoksella sekä kankaan ja seinän väliin asennettavalla liima- tai butyyylimassalla. Suunnitteluratkaisu soveltuu hyvin käytettäväksi myös harkkorakenteisissa pientaloissa.

Kattoristikoiden tuella vaikuttavaa tukipaineen kestävyyttä voidaan tarvittaessa parantaa ristikon molemmille puolille asennettavilla tukipainekulmilla, mikäli ratkaisussa esitetty 120 mm:n tukileveys ei ole riittävä.

Kun ulkoseinän eristemateriaalina käytetään hyvin vesihöyryä läpäisevää eristettä ja sisäkuorella on mahdollisuus kuivua myös ulospäin, voidaan alaslaskutilan sivuilla käyttää vaihtoehtoisesti alumiinipintaista polyuretaanilevyä. Ennen seinän yläosaan tulevan höyrynsulkulevyn asennusta on kuitenkin varmistuttava, että betonisen sisäkuoren kosteuspiitoisuus alittaa tiiviin pinnoitteen asentamiselle annetut arvot.



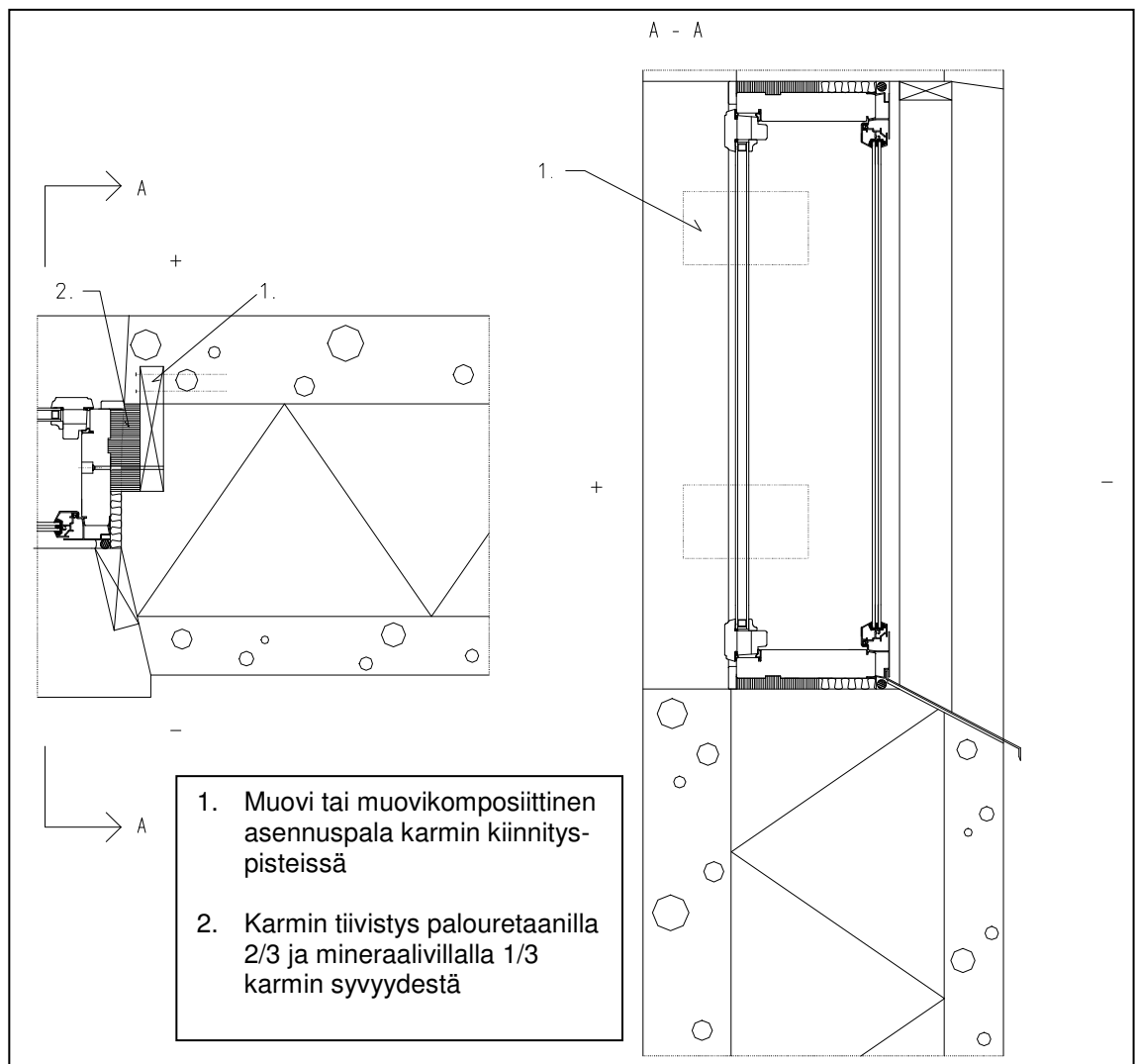
Kuva 8. Passiivitalokonseptin yläpohja.

4.4 Ikkunat ja ovet

Ikkunoiden ja ovien sijainti rakenteessa on lämmöneristeen kohdalla, mahdollisimman lähellä eristeen sisäpintaa. Ikkuna on MSE-ikkuna, jossa on lämpölaselementit sisä- ja ulkopuitteessa. Lasitus voi olla 2+2 tai 3+2 lasitusyhdistelmä, joilla lämpölaselementtien välitila pysyy ulkolämpötilaa lämpimämpänä. Ikkunakarmien kiinnityksessä ulkoseinäelementtiin käytetään muovisia tai muovikomposiittisia asennuspaloja. Asennuspalat asennetaan muottiin ennen valua ikkuna- tai ovikarmin kiinnityspisteisiin. Ikkunoiden ja ovien asennuksessa asennuspalan ja karmin väliin jäävä tila tiivistetään palouretaanivaahdolla. Liitos tiivistetään ulkopuolelta mineraalivillalla 1/3 karmin syvyydelle. Tällä varmistetaan

taan karmirakenteen kuivumismahdollisuus ulospäin sekä liitoksen tiiveys. Ikkunaliitos ulkoseinään on esitetty kuvassa 9.

Toteutustapaa voidaan käyttää myös harkkorakenteisissa pientaloissa. Tällöin ikkunoiden ja ovien kiinnityspalojen asennus huomioidaan harkkojen ladonta- tai muuraustyössä jättämällä aukon kohdalla kiinnityspalan sijaintikohdassa harkko asennuspalan ja täyttölaastin vaatiman tilan verran aukon pieltä taaemmaksi.



Kuva 9. Passiivitalokonseptin ikkunat ja ovet.

4.5 Passiivitalokonseptin ohjeistus

Valitut suunnitteluratkaisut määrittelevät toteutettavan rakennuksen energiatehokkuuden tavoitetason. Passiivitaloihin on mahdollista tehdä eri rakenteille soveltuvia vakioratkaisuja, joiden soveltuvuuteen kohteessa vaikuttavat kuitenkin aina myös esimerkiksi tontin olosuhteet, arkkitehtuuri, rakentamisaikataulu sekä kustannukset. Taulukossa 3 on esitetty passiivitalokonseptin tarkistuslista.

PASSIIVITALOKONSEPTIN TARKISTUSLISTA	Vaatimukset		Avaintekijät		
	U-arvo	Tarkistus x = kyllä, v = ei	Tiiveys	Lämmöneristävyyys	Kylmäsiilat
Maanvarainen alapohja <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kylmäsilta maapohjasta anturaan katkaistu lämpökatkolla ▪ Perusmuurin betoninen sisäkuori lämmöneristetty sisäpinnasta ▪ Perusmuurin lämpöhäviöt ulkoilmaan ja maapohjaan katkaistu alapohjan ja ulkoseinän liitoksessa ▪ Alapohjan eristeiden kokoonpuristuvuus mahdollisimman pieni ▪ Alapohjan ja ulkoseinän liitos tiivis ilmanvuoja vastaan ▪ Läpivientien tiivistys ohjeistettu 	0,09		0		0
Tuulettuva alapohja <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kylmäsilta maapohjasta anturaan katkaistu lämpökatkolla ▪ Tuulettutilassa perusmaan päällä on kapillaarisoratyttö ja lämmöneristekerros ▪ Perusmuurin lämpöhäviöt ulkoilmaan ja tuulettutilaan katkaistu alapohjan ja ulkoseinän liitoksessa ▪ Kantavan lattiarakenteen ja perusmuurin liitos tiivistetty ilmanvuoja vastaan ▪ Kantavan lattiarakenteen saumat ja läpiviennit tiivistetty ilmanvuoja vastaan ▪ Alapohjarakenne eristetty pääosin alapuolelta 	0,09		0		0
Ulkoseinä <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ulkoseinän lämmöneristekerroksen paksuus yhtenäinen myös kulmissa ja välipohjan kohdalla ▪ Seinäelementtien liitokset tiivistetty ilmanvuoja vastaan ▪ Ansaidden määrä rakenteessa optimoitu ▪ Liitokset muihin rakenteisiin ja läpiviennit seinässä tiivistetty 	0,09		0		0
Yläpohja <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ulkoseinän ja yläpohjan liitoksen toteutus ilman kylmäsiltaa ▪ Ulkoseinän ja yläpohjan liitos tiivistetty ilmanvuoja vastaan ▪ LVI putkituksille sekä läpiviennille lämmin alaslaskutila höyrynsulun alapuolella ▪ Höyrynsulkuratkaisu pitkäikäinen ja vaurioitumaton myös rakennusaikana ▪ Höyrynsulkuratkaisu yhtenäinen ja läpiviennit tiivistetty ▪ Paksun lämmöneristekerroksen toteutus vähän painuvalla tai painumattomalla materiaalilla ▪ Tuulettutilassa riittävä tuuletus tai tuulettutilan lämmöneristävyyden parantaminen 	0,07		0		0
Ikkunat <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ikkunan sijainti lämmöneristeen kohdalla, mahdollisimman lähellä seinän sisäpintaa ▪ Kiinnitys ulkoseinään toteutettu kiinnikkeillä, joilla alhainen lämmönjohtavuus ▪ Kiinnitysjärjestelmä kestää kosteusrasitukset ja kuormat ilman muodonmuutoksia 	0,8		0		0
Ovet <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ulko-oven sijainti lämmöneristeen kohdalla ▪ Kiinnitys ulkoseinään toteutettu kiinnikkeillä, joilla alhainen lämmönjohtavuus ▪ Kiinnitysjärjestelmä kestää kosteusrasitukset ja kuormat ilman muodonmuutoksia 	0,7		0		0
Ilmavuotoluku $q_{50} < 0,6$ 1/h			0		

Taulukko 3. Passiivitalokonseptin tarkistuslista

Passiivitalokonseptin tarkistuslista toimii rakennesuunnittelijan tehtävälisänä suunnitteluvaiheessa. Suunnitteluratkaisujen toimivuuden kannalta oleellisia ovat myös rakennusosien valmistusvaihe, asennus sekä käytön aikaiset huolto-toimet. Rakennusvaiheen kriittiset vaiheet tulee sisällyttää työohjeisiin ja käyttö-vaiheen tehtävät kiinteistön huolto-ohjeisiin. Taulukossa 4 on esitetty ohjeistet-tavia rakenteiden toimivuuden kannalta olennaisia seikkoja työmaan ja käyttä-jän näkökulmasta. Tarkistuslistat pohjautuvat tälle tutkimukselle asetettuihin tutkimustehtäviin, teknisiin kysymyksiin ja avaintekijöihin sekä saatuihin tuloksiin ja rakennusalalla yleisesti käytössä oleviin tarkastusasiakirjamalleihin.

Rakennusosien toimivuuden varmistaminen rakennus- ja käyttövaiheessa		
Rakennusosa	Rakennusvaihe Ohjeet / päätehtävät	Käyttövaihe Ohjeet / tarkistustehtävät
Alapohja	Passiivitalokonseptin mukainen rakenne Maa-aineksen kelpoisuuden varmistus Maapohjan kapillaarikerrokset, lämmöneristys Läpiviennit ja liittyvät rakenteet, tiiveys Kosteudenhallinta, pinnoitettavuus Märkätilojen vedeneristys	Maanpinnan kallistukset sokkelista pois päin Sadevesikaivojen ja salaojien toiminta Pintamateriaalien kunto
Ulkoseinä	Passiivitalokonseptin mukainen rakenne Elementtitehtaan laadunvalvonta Elementtien suojaus Ilmantiiveyden varmistaminen Liitosten ja läpivientien toteutus Kosteudenhallinta, pinnoitettavuus Sisäkuoren kuivumisen varmistaminen	Ulkokuoren tarkistustehtävät: - ulkopinnan kunto - julkisivuliitosten tiiveys - ikkunoiden liitokset ja vesipellit - halkeaminen tiivistys ja korjaus - ulkokuoreen liittyvien kiinnitysten kunto Sisäkuoren tarkistustehtävät: - sisäpinnan kunto (halkeamat yms., korjaus)
Yläpohja	Passiivitalokonseptin mukainen rakenne Materiaalien varastointi, kelpoisuus Asennus tiiviisti, konvektion minimointi Höyrynsulkulevyn asennus ja tiivistäminen Tuuletusvälin toiminnan varmistaminen Vesitiivis ja kondessisuojaattu aluskate Huolto- ja tarkistusluukut (vesikatolta)	Tuuletustilan olosuhteiden tarkistus Vesikatteen kunto, tiiveyden tarkistus Räystäät ja vesikourut, vedenpoiston tarkistus
Ikkunat ja ovet	Passiivitalokonseptin mukainen rakenne Kosteudenhallintasuunnitelma asennuksessa Liitosten tiivistäminen	Vesipeltien kallistukset Liitosten tiiveys ja kunto Ikkunoiden kunto ja huolto

Taulukko 4. Rakennusosien toimivuuden varmistaminen

5 Yhteenveto ja pohdinta

Työn tuloksena kehitetty passiivitalokonsepti on yksi malli rakennuksen ulkovai-
pan toteutuksesta, joka vastaa passiivitalon rakennusosille asetettuja ohjeellisia
arvoja. Suunnitteluratkaisuissa on pyritty mahdollisimman yksinkertaisiin raken-
teisiin, jotka ovat työmaan kannalta toteutettavissa järkevästi ja kustannuste-
hokkaasti.

Betonisandwich-rakenteessa betoninen sisäkuori kuivuu vesihöyrytiiviillä solu-
muovieristeillä eristetyssä ulkoseinässä lähes pelkästään sisätiloihin. Erityisesti
polyuretaanieristeisen seinän pinnoituskuivuus saavutetaan ilman erityistoimia
erittäin hitaasti. Tässä tutkimuksessa se vaati noin 8 kk:n kuivumisajan, kun
tarkastelu tehtiin $0,4 \cdot d$ sisäkuoren syvyydeltä. Vastaavasti samalta syvyydeltä
mitattu mineraalivillaeristeinen seinä kuivui lähes puolet nopeammassa ajassa.
Toisaalta huokoisissa eristeissä voi passiivitasen eristepaksuuksilla eristeker-
roksen sisäinen konvektio muodostua haitalliseksi.

Pientaloissa voi olla mahdollista kaventaa sisäkuoren paksuutta tutkitusta ra-
kenteesta, joka nopeuttaisi sisäkuoren pinnoituskuivuuden saavuttamista. Myös
betonimassan ominaisuudet ja rakennusaikaisen kosteudenhallinnan toimenpi-
teet tulee ohjeistaa sisäkuoren kuivumisen nopeuttamiseksi. Betonisandwich-
rakenteen osalta saadut tulokset sisäkuoren lämpö- ja kosteusteknisestä toi-
minnasta ovat samansuuntaisia kuin Tekesin, Ympäristöministeriön sekä ra-
kennusalan toimialaliittojen rahoittamassa Frame-hankkeessa. Tutkimushank-
keen tulokset löytyvät muun muassa internetsivuilta
www.rakennusteollisuus.fi/frame.

Opinnäytetyön sisältö vastaa käytännössä suunnittelun kokonaisuutta, joka tuli-
si kokonaisenergiatarkastelun seurauksena tehdä osana suunnittelua jo hank-
keen alkuvaiheessa. Pientalohankkeissa eri osa-alueiden suunnittelijoita ei ole
kuitenkaan usein vielä rakennuslupavaiheessa valittu. Tämän passiivitalokon-

septin suunnitteluratkaisujen yhtenä tarkoituksena onkin tarjota valmiita ratkaisuja kivitaloihin helpottamaan kokonaisuuden hallintaa. Valmiin konseptin etuja voivat olla myös aikataulujen nopeutuminen, kustannussäästöt sekä ensisijaisesti rakentamisen laadun varmistaminen.

Kivirakenteisen passiivitalon suunnittelussa tulee huomioida lämmöneristävyyden lisäksi rakennusosien ja liitosten kylmäsillat sekä varmistaa hyvä ilmatiiveys. Liitoksen kohdalla lämmöneristävyys ei saa heikentyä verrattuna liittyviin rakennusosiin. Kylmäsillat minimoidaan käyttämällä liitoksen kohdalla betonia alhaisemman lämmönjohtavuuden arvon omaavia materiaaleja. Ilmatiiveys varmistetaan liitosten porrastuksilla sekä tiivistystuotteilla. Suunnitteluratkaisusta muodostuva kokonaisuus täyttää kylmäsillojen, lämmöneristävyyden ja tiiveyden osalta passiivitalojen ohjeelliset vaatimukset.

Opinnäytetyössä kehitetty suunnitteluratkaisujen passiivitalokonsepti toimii kivirunkoisten talojen ulkovaipan suunnittelun ohjeistuksena, kun tavoitteena on passiivienergiatalo. Samat periaatteet toimivat monelta osin myös muista materiaaleista tehtävissä pientaloissa.

Esitettyjen rakenteiden toimivuus on riippuvainen myös tulevista ilmasto-olosuhteiden muutoksista sekä ilmanvaihdon säädöistä ja oikeasta mitoitukselta. Ulkoseinän kosteusteknistä toimintaa on mallinnettu käyttämällä tutkimukseen valittuja materiaalitietoja. Mahdolliset muutokset mallinnuksessa ja rakenteiden toimivuuden arvioinneissa käytettyihin seikkoihin vaikuttavat tulosten luotettavuuteen.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli löytää luovia ratkaisuja passiivirakenteiden toteuttamiselle. Tästä syystä tutkimuksessa ei tehdä kattavaa analyysia olemassa olevista tutkimuksista tai toteutetuista passiivitalokohteista ja työn tulokset perustuvat tässä opinnäytetyössä käsiteltyyn teoria-aineistoon. Työssä esitetyistä suunnitteluratkaisuksista voi löytyä vastaavantyyppisiä rakenteita jo toteutetuista passiivitalokohteista. Työn tavoitteena on ollut toimivien ratkaisujen yhtenäinen kokonaisuus eli suunnitteluratkaisujen passiivitalokonsepti kivitaloihin. Rakent-

neratkaisut ovat osittain jatkojalostettuja malleja pohjautuen kokemukseen harkkorakentamisesta.

Kiinnostavia jatkotutkimuksen aiheita voisivat olla tämän passiivitalokonseptin mukaisen kohteen suunnittelu ja toteutus. Tutkimuksen aiheena voisi olla arkkitehtuurin keinot matalaenergiarakentamisessa ja / tai eri energiamuotojen vaikutus energiatehokkuuteen tämän passiivitalokonseptin mukaisesti toteutettuun rakennukseen. Tavoitteena voisi olla 0-energia- tai plusenergiatalon vaatimustaso, joissa energiaratkaisut tulevat passiivirakentamista voimakkaammin kuvaan mukaan. Myös työssä esitettyjen liitosten tarkempi analysointi kylmäsiltojen mallintamisen ohjelmistoilla toisi arvokasta lisätietoa vaikutuksesta ulkovai-
pan lämpöhäviöistä.

Lisäksi kiinnostavia tutkimusaiheita voisi olla korjausrakentamisen osa-alueelta esimerkiksi eristeharkkorunkoisten talojen lisälämmöneristäminen ja sen vaikutukset energiatehokkuuteen sekä rakennusfysikaalisen toimintaan.

Opinnäytetyön perusteella voi todeta passiivitalon olevan yksityiskohdista muodostuva kokonaisuus. Onnistuminen passiivienergiatalon toteutuksessa vaatii tämän kokonaisuuden hallintaa sekä suunnittelun ja rakentamisen laatua.

KUVAT

Kuva 1. Maanvaraisen alapohjarakenteen tekniset kysymykset, s. 20

Kuva 2. Tuulettuvan alapohjarakenteen tekniset kysymykset, s. 22

Kuva 3. Tuulettuvan yläpohjan tekniset kysymykset, s. 23

Kuva 4. Ikkuna- ja oviliitoksen tekniset kysymykset, s. 25

Kuva 5. Passiivitalokonseptin ulkoseinä, s.32

Kuva 6. Passiivitalokonseptin maanvarainen alapohja, s. 34

Kuva 7. Passiivitalokonseptin tuulettuva alapohja, s. 35

Kuva 8. Passiivitalokonseptin yläpohja, s. 37

Kuva 9. Passiivitalokonseptin ikkunat ja ovet, s. 38

KAAVIOT

Kaavio 1. Sisäkuoren kosteus, s. 28

Kaavio 2. Ulkokuoren kosteus, s. 30

TAULUKOT

Taulukko 1. Passiivitalokonseptin avaintekijöiden tavoitearvot, s. 10

Taulukko 2. Passiivitaloelementin eristevertailu, s. 17

Taulukko 3. Passiivitalokonseptin tarkistuslista, s. 39

Taulukko 4. Rakennusosien toimivuuden varmistaminen, s. 40

LÄHTEET

Aho, H & Korpi, M. (toim.) 2009. Ilmanpitävien rakenteiden ja liitosten toteutus asuinrakennuksissa. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto.

C3 Rakennuksen lämmöneristys 2010. Määräykset. Helsinki. Ympäristöministeriö.

C4 Lämmöneristys 2003. Ohjeet. Helsinki. Ympäristöministeriö.

C4 Lämmöneristys luonnos 16.3.2012. Ohjeet. Helsinki. Ympäristöministeriö.

D2 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto 2012. Määräykset ja ohjeet. Helsinki. Ympäristöministeriö.

D3 Rakennusten energiatehokkuus 2010. Määräykset ja ohjeet. Helsinki. Ympäristöministeriö.

D3 Rakennusten energiatehokkuus 2012. Määräykset ja ohjeet. Helsinki. Ympäristöministeriö.

D5 Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta 2007. Ohjeet. Helsinki. Ympäristöministeriö.

D5 Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta luonnos 14.3.2012. Ohjeet. Helsinki. Ympäristöministeriö.

Direktiivi rakennusten energiatehokkuudesta 2010/31/EU. Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto EU.

Frame. Seminaariesitykset. Rakennusteollisuus ry. www.rakennusteollisuus.fi.

Hakkarainen, T. & Vinha, J. 2010. Betonisandwich-elementtien lämpö- ja kosteustekninen toiminta lämmöneristyspaksuuden kasvaessa. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto.

Hemmilä, K. 2012. Lasin Maailma 1/2012. Passiivitalon ikkunoiden valinta. Forssa.

Kurnitski, J. 2012. Energiamääräykset 2012. Sastamala. Suomen Rakennusmedia Oy.

Lahdensivu, Suonketo, Vinha, Lindberg, Manelius, Kuhno, Saastamoinen, Salminen & Lähdesmäki 2012. Matalaenergia- ja passiivitalojen rakenteiden ja liitosten suunnittelu- ja toteutusohjeita. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto.

Laukkarinen, A. 2011. Tuulettujen yläpohjien toiminta. Frame –projektin yleisöseminaari (kalvot) 1.12.2011. Helsinki.

Lylykangas, K. 2012. Energiatehokkuus ja arkkitehtisuunnittelu. Luentokalvot 14.3.2012. www.lahti.fi.

Passiivipientalot ja huoneistot sertifiointiperusteet. VTT SERT. R042/09. VTT. 2009.

Puurakenteen U-arvon määrittäminen. Puuinfo. www.puuinfo.fi.

Rakennuslehti 20.9.2012. Espoossa rakennetaan saksalaiset kriteerit täyttävä passiivitalo (artikkeli), s.12.

RIL 249-2009 Matalaenergiarakentaminen asuinrakennukset. Saarijärvi. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RIL 255-2010 (luonnos) luku 4 Lämpö ja lämmön siirtyminen / Juha Vinha 13.10.2010. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. www.ril.fi.

RIL 255-2010 (luonnos) luku 6 Kosteus ja kosteuden siirtyminen/ Juha Vinha. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. www.ril.fi.

SFS-EN 13829 Thermal performance of buildings. Suomen standardisoimisliitto SFS ry 2001.

Suutarinen, M. 2008. Matalaenergiarakentamiseen soveltuvat betonijulkisivuelementit asuinrakennuksissa. Espoo.

Tasauslaskentaopas 2012. Helsinki. Ympäristöministeriö.

Tekninen liite (28.3.2011) muistioon: Ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatehokkuudesta. Helsinki. Ympäristöministeriö.

TRT/1706/2008. Matalaenergiarakenteiden toimivuus. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto.

U-arvon korjaustekijät EN ISO 6946.xls. D.o.f. tech Oy. www.dof.fi.

Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas 2011. Helsinki. Ympäristöministeriö.

Vinha, J. 2011. Betonisandwich –rakenteiden kosteustekninen toiminta. Frame –seminaari 1 (kalvot 26.11.2011). Helsinki.

Vinha, Korpi, Kalamees, Jokisalo, Eskola, Palonen, Kurnitski, Aho, Salminen, Salminen & Keto 2009. Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto.

VTT-R-07901-11. Betonielementtirakenteisen rakennuksen vaipan kylmäsilta-tarkastelut. Espoo. VTT. 2011.

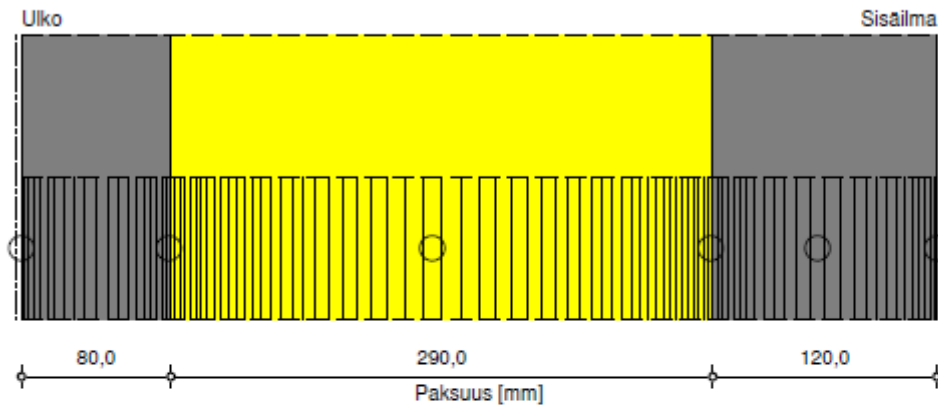
VTT-S-10816-08. Lausunto rakenteiden energiatehokkuuden parantamisen vaikutuksista rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen. Espoo. VTT. 2008.

VTT-R-04025-11. Maanvastaisen alapohjan routasuojaus. Espoo. VTT. 2011.

WUFI® Pro 5.1

Rakennekomponentit

Tapaus: US1 (PU 290)



○ - Monitorointipisteet

Materiaalit :



- Betoni, w/c=0.5



- *PU (Lämmönj.: 0,024 W/mK, diffuusiotiiviit laminaatit) (Avoin)



- Betoni, w/c=0.5

Sd-arvo Ulk. [m]: 0,2

Kokonaispaksuus: 0,49 m

R-arvo: 12,0 m²K/W

U-arvo: 0,082 W/m²K

Reunaehdot

Ulkopuoli (vasen)

Sijainti: Jyväskylä; Finnish Meteorological Institute
Ilmansuunta / Kallistuskulma: Etelä / 90 °

Sisäpuoli (oikea)

Sisäilmasto: EN 15026
Normaali kosteuskuorma

Pinnan siirtokertoimet

Ulkopuoli (vasen)

Nimi	Yksikkö	Arvo	Kuvaus
Lämmönvastus	[m ² K/W]	0,0588	Ulkoseinä
Sd-arvo	[m]	0,2	Mineraalirappaus (ilman sadetta)
Lyhytaaltainen absorptiokerroin	[-]	0,4	Pintarappaus, normaalin vaalea
Pitkäaalton säteilyn emissiokerroin	[-]	0,9	Pintarappaus, normaalin vaalea
Sateen absorptiokerroin	[-]	0,7	Kallistuskulman ja rak.tyytin mukaa

Sisäpuoli (oikea)

Nimi	Yksikkö	Arvo	Kuvaus
Lämmönvastus	[m ² K/W]	0,125	Ulkoseinä
Sd-arvo	[m]	----	Ei pinnoitetta

Explisiittinen säteilytase

Ulkopuoli (vasen)

Nimi	Arvo
Sallittu	ei

Viimeisen laskennan tulokset

Laskennan tilanne

Simulointi: Aika ja päivämäärä	6.4.2012 9:46:05
Laskennan kesto	0 min,31 s
Konvergoituvirheiden lukumäärä	0
Sateen absorptiovirheiden lukumäärä	0

Tarkista numeroiden esitystapa

Virrat u (kl,dl) [kg/m ²]	2,09 -3,3
Virrat s (kr,dr) [kg/m ²]	0,22 4,67
Tasapaino 1 [kg/m ²]	-6,1
Tasapaino 2 [kg/m ²]	-6,1

Kosteuspitoisuus [kg/m³]

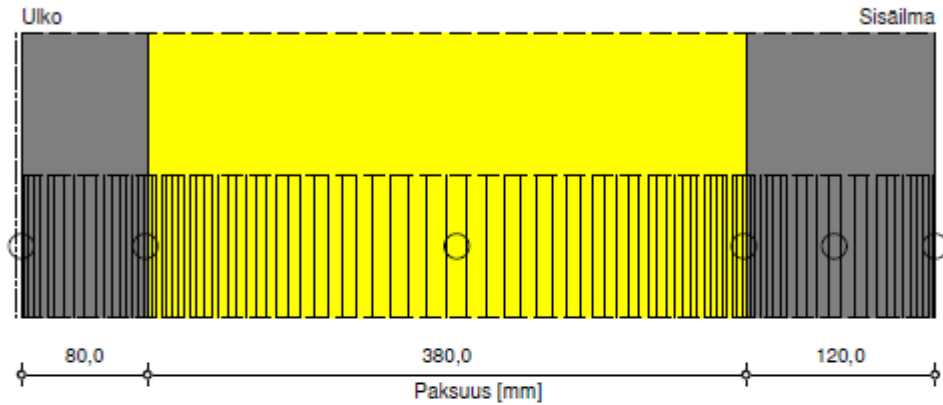
Kerros/Materiaali	Lask. alku	Lask. loppu	Min.	Max.
Betoni, w/c=0.5	118,00	102,84	95,74	120,16
*PU (Lämmönj.: 0,024 W/mK, diffuusiotiv	7,38	7,16	7,16	7,39
Betoni, w/c=0.5	118,00	76,87	76,87	118,00
Kokonaiskosteus [kg/m ³]	25,74	19,53	19,13	25,74

Virtojen aikaintegraali

Lämpövirta, vasen puoli [MJ/m ²]	-131,69
Lämpövirta, oikea puoli [MJ/m ²]	-128,48
Lämmönlähteet [MJ/m ²]	0,0
Kosteusvirrat, vasen puoli [kg/m ²]	-1,24
Kosteusvirrat, oikea puoli [kg/m ²]	4,98
Kosteuslähteet [kg/m ²]	0,0
Rajoitetut kosteuslähteet [kg/m ²]	0,0


Rakennekomponentit

Tapaus: US2 (EPS 380)



○ - Monitorointipisteet

Materiaalit :

 - Betoni, w/c=0.5 - *EPS (Lämmönj...: 0.031 W/mK - Tiheys: 18 kg/m³) (Avoin) - Betoni, w/c=0.5

Sd-arvo Ulk. [m]: 0,2

Kokonaispaksuus: 0,58 m

R-arvo: 11,75 m²K/W

U-arvo: 0,084 W/m²K

Reunaehdot

Ulkopuoli (vasen)

Sijainti: Jyväskylä; Finnish Meteorological Institute
Ilmansuunta / Kallistuskulma: Etelä / 90 °

Sisäpuoli (oikea)

Sisäilmasto: EN 15026
Normaali kosteuskuorma

Pinnan siirtokertoimet

Ulkopuoli (vasen)

Nimi	Yksikkö	Arvo	Kuvaus
Lämmönvastus	[m ² K/W]	0,0588	Ulkoseinä
Sd-arvo	[m]	0,2	Mineraalirappaus (ilman sadetta)
Lyhytaaltainen absorptiokerroin	[-]	0,4	Pintarappaus, normaalin vaalea
Pitkäaaltainen säteilyn emissiokerroin	[-]	0,9	Pintarappaus, normaalin vaalea
Sateen absorptiokerroin	[-]	0,7	Kallistuskulman ja rak.tyyppin mukaa

Sisäpuoli (oikea)

Nimi	Yksikkö	Arvo	Kuvaus
Lämmönvastus	[m ² K/W]	0,125	Ulkoseinä
Sd-arvo	[m]	----	Ei pinnoitetta

Explisiittinen säteilytase

Ulkopuoli (vasen)

Nimi	Arvo
Sallittu	ei

WUFI® Pro 5.1

Viimeisen laskennan tulokset

Laskennan tilanne

Simulointi: Aika ja päivämäärä	6.4.2012 9:48:33
Laskennan kesto	0 min,30 s
Konvergointivirheiden lukumäärä	0
Saleen absorptiovirheiden lukumäärä	0

Tarkista numeroiden esitystapa

Virrat u (kl,dl) [kg/m ²]	1,51 -3,16
Virrat s (kr,dr) [kg/m ²]	0,25 4,35
Tasapaino 1 [kg/m ²]	-6,25
Tasapaino 2 [kg/m ²]	-6,25

Kosteuspitoisuus [kg/m³]

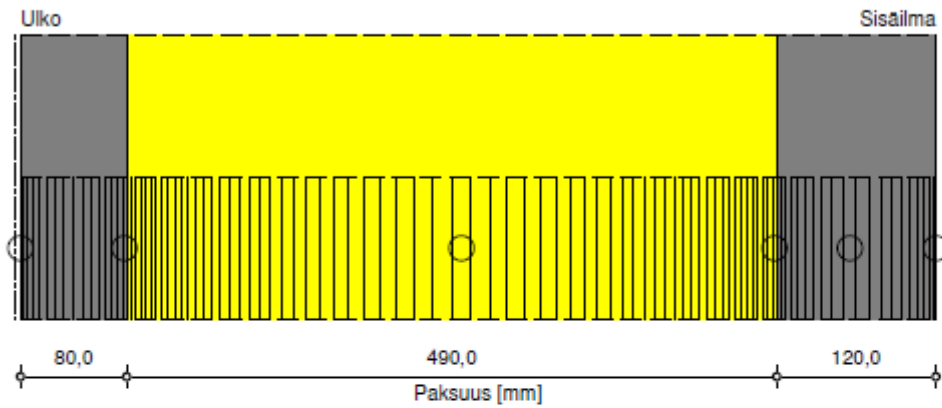
Kerros/Materiaali	Lask. alku	Lask. loppu	Min.	Max.
Betoni, w/c=0.5	118,00	106,77	99,91	120,81
*EPS (Lämmönj...: 0.031 W/mK - Tiheys:	7,38	7,18	7,18	8,02
Betoni, w/c=0.5	118,00	72,92	72,92	118,00
Kokonaiskosteus [kg/m ³]	26,41	20,02	19,68	26,41

Virtojen aikaintegraali

Lämpövirta, vasen puoli [MJ/m ²]	-151,54
Lämpövirta, oikea puoli [MJ/m ²]	-148,44
Lämmönlähteet [MJ/m ²]	0,0
Kosteusvirrat, vasen puoli [kg/m ²]	-1,68
Kosteusvirrat, oikea puoli [kg/m ²]	4,71
Kosteuslähteet [kg/m ²]	0,0
Rajoitetut kosteuslähteet [kg/m ²]	0,0


Rakennekomponentit

Tapaus: US3 (min.villa 490)



○ - Monitorointipisteet

Materiaalit :

 - Betoni, w/c=0.5 - *Mineraalivilla (Lämmönj.: 0,035 W/mK) (Avoin) - Betoni, w/c=0.5

Sd-arvo Ulk. [m]: 0,2

Kokonaispaksuus: 0,69 m

R-arvo: 13,75 m²K/W

U-arvo: 0,072 W/m²K

Reunaehdot

Ulkopuoli (vasen)

Sijainti: Jyväskylä; Finnish Meteorological Institute
Ilmansuunta / Kallistuskulma: Etelä / 90 °

Sisäpuoli (oikea)

Sisäilmasto: EN 15026
Normaali kosteuskuorma

Pinnan siirtokertoimet

Ulkopuoli (vasen)

Nimi	Yksikkö	Arvo	Kuvaus
Lämmönvastus	[m ² K/W]	0,0588	Ulkoseinä
Sd-arvo	[m]	0,2	Mineraalirappaus (ilman sadetta)
Lyhytaaltainen absorptiokerroin	[-]	0,4	Pintarappaus, normaalin vaalea
Pitkäaaltainen säteilyn emissiokerroin	[-]	0,9	Pintarappaus, normaalin vaalea
Sateen absorptiokerroin	[-]	0,7	Kallistuskulman ja rak.tyypin mukaa

Sisäpuoli (oikea)

Nimi	Yksikkö	Arvo	Kuvaus
Lämmönvastus	[m ² K/W]	0,125	Ulkoseinä
Sd-arvo	[m]	----	Ei pinnoitetta

Explisiittinen säteilytase

Ulkopuoli (vasen)

Nimi	Arvo
Sallittu	ei

WUFI® Pro 5.1

Viimeisen laskennan tulokset

Laskennan tilanne

Simulointi: Aika ja päivämäärä	6.4.2012 9:52:53
Laskennan kesto	0 min,46 s
Konvergoituvirheiden lukumäärä	0
Sateen absorptiovirheiden lukumäärä	0

Tarkista numeroiden esitystapa

Virrat u (kl,dl) [kg/m ²]	0,01 -3,1
Virrat s (kr,dr) [kg/m ²]	0,28 3,51
Tasapaino 1 [kg/m ²]	-6,89
Tasapaino 2 [kg/m ²]	-6,89

Kosteuspitoisuus [kg/m³]

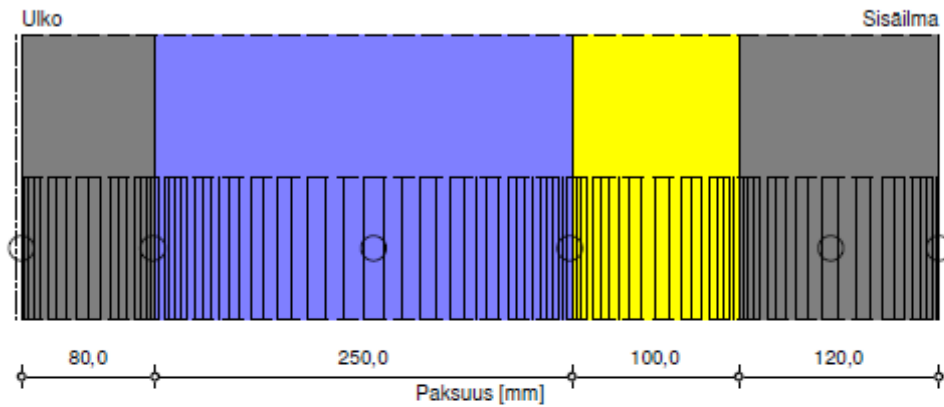
Kerros/Materiaali	Lask. alku	Lask. loppu	Min.	Max.
Betoni, w/c=0.5	118,00	109,67	104,29	127,25
*Mineraalivilla (Lämmönj.: 0,035 W/mK) (4	0,00	2,09	0,00	3,06
Betoni, w/c=0.5	118,00	56,20	53,01	118,00
Kokonaiskosteus [kg/m ²]	23,6	16,54	16,3	23,6

Virtojen aikaintegraali

Lämpövirta, vasen puoli [MJ/m ²]	-117,99
Lämpövirta, oikea puoli [MJ/m ²]	-116,03
Lämmönlähteet [MJ/m ²]	0,0
Kosteusvirrat, vasen puoli [kg/m ²]	-3,13
Kosteusvirrat, oikea puoli [kg/m ²]	3,92
Kosteuslähteet [kg/m ²]	0,0
Rajoitetut kosteuslähteet [kg/m ²]	0,0





Rakennekomponentit

Tapaus: US4 (PU 100 + EPS 250)



○ - Monitorointipisteet

Materiaalit :

-  - Betoni, w/c=0.5
-  - *EPS (Lämmönj...: 0.031 W/mK - Tiheys: 18 kg/m³) (Avoin)
-  - *PU (Lämmönj.: 0.024 W/mK) (diffuusioliivis)
-  - Betoni, w/c=0.5

Sd-arvo Ulk. [m]: 0,2

Kokonaispaksuus: 0,55 m

R-arvo: 11,87 m²K/W

U-arvo: 0,083 W/m²K

Reunaehdot

Ulkopuoli (vasen)

Sijainti: Jyväskylä; Finnish Meteorological Institute
Ilmansuunta / Kallistuskulma: Etelä / 90 °

Sisäpuoli (oikea)

Sisäilmasto: EN 15026
Normaali kosteuskuorma

Pinnan siirtokertoimet

Ulkopuoli (vasen)

Nimi	Yksikkö	Arvo	Kuvaus
Lämmönvastus	[m ² K/W]	0,0588	Ulkoseinä
Sd-arvo	[m]	0,2	Mineraalirappaus (ilman sadetta)
Lyhytaaltainen absorptiokerroin	[-]	0,4	Pintarappaus, normaalin vaalea
Pitkäaaltainen säteilyn emissiokerroin	[-]	0,9	Pintarappaus, normaalin vaalea
Sateen absorptiokerroin	[-]	0,7	Kallistuskulman ja rak.tyypin mukaa

Sisäpuoli (oikea)

Nimi	Yksikkö	Arvo	Kuvaus
Lämmönvastus	[m ² K/W]	0,125	Ulkoseinä
Sd-arvo	[m]	----	Ei pinnoitetta

Explisiittinen säteilytase

Ulkopuoli (vasen)

Nimi	Arvo
Sallittu	ei

WUFI® Pro 5.1

Viimeisen laskennan tulokset

Laskennan tilanne

Simulointi: Aika ja päivämäärä	6.4.2012 9:29:05
Laskennan kesto	0 min,31 s
Konvergointivirheiden lukumäärä	0
Sateen absorptiovirheiden lukumäärä	0

Tarkista numeroiden esitystapa

Virrat u (kl,dl) [kg/m ²]	1,59 -3,22
Virrat s (kr,dr) [kg/m ²]	0,25 4,63
Tasapaino 1 [kg/m ²]	-6,5
Tasapaino 2 [kg/m ²]	-6,5

Kosteuspitoisuus [kg/m³]

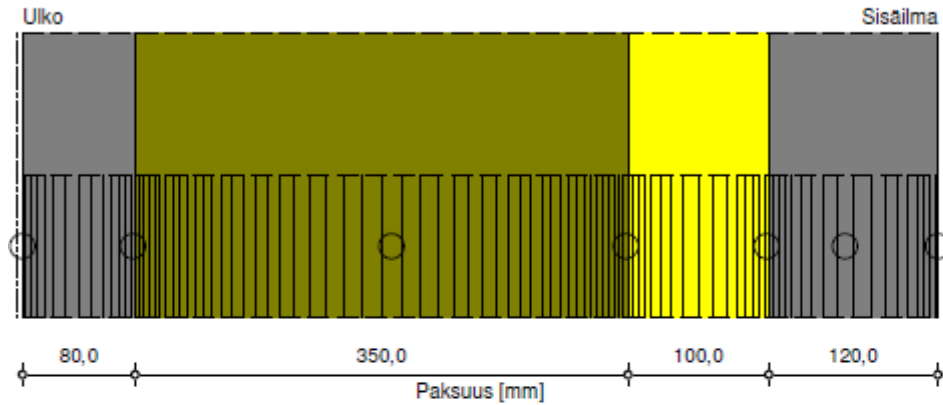
Kerros/Materiaali	Lask. alku	Lask. loppu	Min.	Max.
Betoni, w/c=0.5	118,00	106,53	99,66	120,76
*EPS (Lämmönj.: 0,031 W/mK - Tiheys: 15,0)	7,38	5,08	5,08	7,38
*PU (Lämmönj.: 0,024 W/mK) (diffuusiotiivisyys: 0,0001)	7,38	5,35	5,35	7,38
Betoni, w/c=0.5	118,00	76,92	76,92	118,00
Kokonaiskosteus [kg/m ³]	26,18	19,56	19,23	26,18

Virtojen aikaintegraali

Lämpövirta, vasen puoli [MJ/m ²]	-141,03
Lämpövirta, oikea puoli [MJ/m ²]	-137,91
Lämmönlähteet [MJ/m ²]	0,0
Kosteusvirrat, vasen puoli [kg/m ²]	-1,65
Kosteusvirrat, oikea puoli [kg/m ²]	4,98
Kosteuslähteet [kg/m ²]	0,0
Rajoitetut kosteuslähteet [kg/m ²]	0,0

Rakennekomponentit

Tapaus: US5 (EPS 100 + min.villa 350)



○ - Monitorointipisteet

Materiaalit :



- Betoni, w/c=0.5



- *Mineraalivilla (Lämmönj.: 0,035 W/mK) (Avoin)



- *EPS (Lämmönj...: 0.031 W/mK - Tiheys: 18 kg/m³) (Avoin)



- Betoni, w/c=0.5

Sd-arvo Ulk. [m]: 0,2

Kokonaispaksuus: 0,65 m

R-arvo: 12,91 m²K/W

U-arvo: 0,076 W/m²K

Reunaehdot

Ulkopuoli (vasen)

Sijainti: Jyväskylä; Finnish Meteorological Institute
Ilmansuunta / Kallistuskulma: Etelä / 90 °

Sisäpuoli (oikea)

Sisäilmasto: EN 15026
Normaali kosteuskuorma

Pinnan siirtokertoimet

Ulkopuoli (vasen)

Nimi	Yksikkö	Arvo	Kuvaus
Lämmönvastus	[m ² K/W]	0,0588	Ulkoseinä
Sd-arvo	[m]	0,2	Mineraalirappaus (ilman sadetta)
Lyhytaaltainen absorptiokerroin	[-]	0,4	Pintarappaus, normaalin vaalea
Pitkäaaltainen säteilyn emissiokerroin	[-]	0,9	Pintarappaus, normaalin vaalea
Sateen absorptiokerroin	[-]	0,7	Kallistuskulman ja rak.tyyppin mukaa

Sisäpuoli (oikea)

Nimi	Yksikkö	Arvo	Kuvaus
Lämmönvastus	[m ² K/W]	0,125	Ulkoseinä
Sd-arvo	[m]	----	Ei pinnoitetta

Explisiittinen säteilytase

Ulkopuoli (vasen)

Nimi	Arvo
Sallittu	ei

WUFI® Pro 5.1

Viimeisen laskennan tulokset

Laskennan tilanne

Simulointi: Aika ja päivämäärä	6.4.2012 9:43:59
Laskennan kesto	0 min,42 s
Konvergointivirheiden lukumäärä	0
Sateen absorptiovirheiden lukumäärä	0

Tarkista numeroiden esitystapa

Virrat u (kl,dl) [kg/m ²]	-1,09 -3,18
Virrat s (kr,dr) [kg/m ²]	0,29 4,09
Tasapaino 1 [kg/m ²]	-8,65
Tasapaino 2 [kg/m ²]	-8,65

Kosteuspitoisuus [kg/m³]

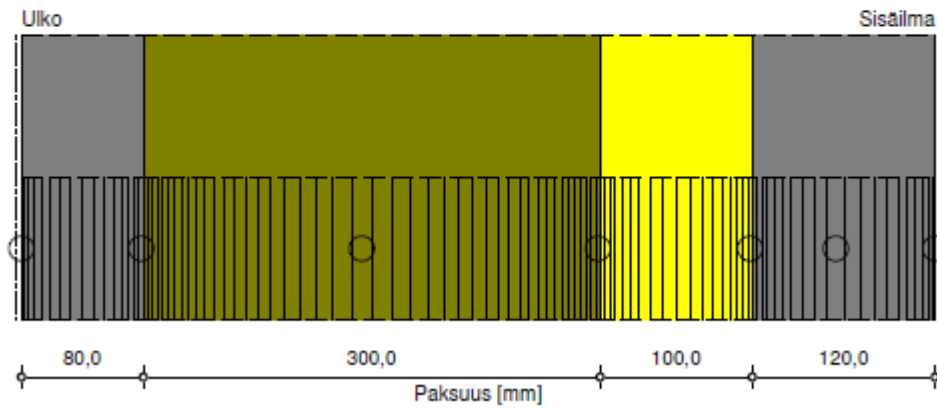
Kerros/Materiaali	Lask. alku	Lask. loppu	Min.	Max.
Betoni, w/c=0.5	118,00	114,97	109,68	133,72
*Mineraalivilla (Lämmönj.: 0,035 W/mK) (k)	7,38	3,18	2,90	7,58
*EPS (Lämmönj...: 0.031 W/mK - Tiheys:	7,38	0,90	0,35	7,38
Betoni, w/c=0.5	118,00	64,29	64,16	118,00
Kokonaiskosteus [kg/m ²]	26,92	18,12	17,94	26,92

Virtojen aikaintegraali

Lämpövirta, vasen puoli [MJ/m ²]	-126,56
Lämpövirta, oikea puoli [MJ/m ²]	-124,31
Lämmönlähteet [MJ/m ²]	0,0
Kosteusvirrat, vasen puoli [kg/m ²]	-4,31
Kosteusvirrat, oikea puoli [kg/m ²]	4,5
Kosteuslähteet [kg/m ²]	0,0
Rajoitetut kosteuslähteet [kg/m ²]	0,0





Rakennekomponentit

Tapaus: US6 (PU 100 + min.villa 300)



○ - Monitorointipisteet

Materiaalit :

-  - Betoni, w/c=0.5
-  - *Mineraalivilla (Lämmönj.: 0,035 W/mK) (Avoin)
-  - *PU (Lämmönj.: 0,024 W/mK) (diffuusiotiivis)
-  - Betoni, w/c=0.5

Sd-arvo Ulk. [m]: 0,2

Kokonaispaksuus: 0,6 m

R-arvo: 12,56 m²K/WU-arvo: 0,078 W/m²K

Reunaehdot

Ulkopuoli (vasen)

Sijainti: Jyväskylä; Finnish Meteorological Institute
Ilmansuunta / Kallistuskulma: Etelä / 90 °

Sisäpuoli (oikea)

Sisäilmasto: EN 15026
Normaali kosteuskuorma

Pinnan siirtokertoimet

Ulkopuoli (vasen)

Nimi	Yksikkö	Arvo	Kuvaus
Lämmönvastus	[m ² K/W]	0,0588	Ulkoseinä
Sd-arvo	[m]	0,2	Mineraalirappaus (ilman sadetta)
Lyhytaaltainen absorptiokerroin	[-]	0,4	Pintarappaus, normaalin vaalea
Pitkäaaltoinen säteilyn emissiokerroin	[-]	0,9	Pintarappaus, normaalin vaalea
Sateen absorptiokerroin	[-]	0,7	Kallistuskulman ja rak.tyyppin mukaa

Sisäpuoli (oikea)

Nimi	Yksikkö	Arvo	Kuvaus
Lämmönvastus	[m ² K/W]	0,125	Ulkoseinä
Sd-arvo	[m]	----	Ei pinnoitetta

Explisiittinen säteilytase

Ulkopuoli (vasen)

Nimi	Arvo
Sallittu	ei

WUFI® Pro 5.1

Viimeisen laskennan tulokset

Laskennan tilanne

Simulointi: Aika ja päivämäärä	6.4.2012 9:39:16
Laskennan kesto	0 min,42 s
Konvergointivirheiden lukumäärä	0
Saleen absorptiovirheiden lukumäärä	0

Tarkista numeroiden esitystapa

Virrat u (kl,dl) [kg/m ²]	0,49 -3,23
Virrat s (kr,dr) [kg/m ²]	0,27 4,61
Tasapaino 1 [kg/m ²]	-7,63
Tasapaino 2 [kg/m ²]	-7,62

Kosteuspitoisuus [kg/m³]

Kerros/Materiaali	Lask. alku	Lask. loppu	Min.	Max.
Betoni, w/c=0.5	118,00	105,89	98,27	129,53
*Mineraalivilla (Lämmönj.: 0,035 W/mK) (k)	7,38	2,21	0,98	7,38
*PU (Lämmönj.: 0,024 W/mK) (diffuusiotiiv)	7,38	4,23	4,23	7,38
Betoni, w/c=0.5	118,00	76,89	76,89	118,00
Kokonaiskosteus [kg/m ³]	26,55	18,78	18,47	26,55

Virtojen aikaintegraali

Lämpövirta, vasen puoli [MJ/m ²]	-124,76
Lämpövirta, oikea puoli [MJ/m ²]	-122,13
Lämmönlähteet [MJ/m ²]	0,0
Kosteusvirrat, vasen puoli [kg/m ²]	-2,78
Kosteusvirrat, oikea puoli [kg/m ²]	4,99
Kosteuslähteet [kg/m ²]	0,0
Rajoitetut kosteuslähteet [kg/m ²]	0,0