

Jere Holmberg

# **SÄÄSTÖBETONIKELLARIN SEINÄN LISÄLÄMMÖNERISTÄMINEN**

Vaikutukset lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan

Kandidaatintyö  
Rakennetun ympäristön tiedekunta  
Eero Tuominen  
Toukokuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Jere Holmberg: Säästöbetonikellarin seinän lisälämmöneristäminen: vaikutukset lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan, *Improving thermal insulation of concrete basement walls: effects on the hygrothermal performance of the structure*

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Rakennustekniikan TkK-tutkinto-ohjelma

Toukokuu 2021

---

Lisälämmöneristämisen ensisijainen tarkoitus yleisesti on rakenteen energiatehokkuuden parantaminen. Maanvastaisissa rakenteissa lisälämmöneristämiseen voidaan päätyä myös korjausteknisistä syistä, esimerkiksi mikrobivaurioituneen rakenteen kohdalla. Sopimattomilla ratkaisuilla voi olla haitallinen vaikutus rakenteen kosteusteknisen toiminnan ja terveellisyyden kannalta.

Tutkimuksessa tarkastellaan jälleenrakennuskauden tyyppillisen pientalon kellarin seinän ja sille esitetyn lisälämmöneristysratkaisun lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. Lisäksi tarkastellaan ratkaisujen rakennusfysikaalisen toimivuuden periaatteita. Alkuperäinen rakenne on sisäpuolelta lastuvillaeristeellä eristetty säästöbetoninen kellarin seinä. Lisälämmöneristetty ratkaisu on molemmin puolin mineraalivillaeristetty rakenne, jota tutkitaan sekä sisäpuolisen mineraalivillaeristeen kanssa että ilman. Tutkimuksessa rakenteiden toimintaa arvioidaan laskennallisesti epästationäärisissä olosuhteissa Delphin-ohjelmiston avulla. Laskenta perustuu yleisiin rakennusfysikaalisiin ilmiöihin, joita käsitellään työn teoriaosuudessa. Laskennan tulosten perusteella arvioidaan lisäksi rakenteiden homehtumisriskiä Suomalaisen homemallin avulla.

Tutkimuksen tuloksista on huomattavissa, että sisäpuolisen lämmöneristeen toiminta on riippuvainen rakenteen toimivasta vedeneristyksestä. Alkuperäisen rakenteen tarkasteluun ei otettu huomioon mahdollista vedeneristyskerrosta, sillä sen asianmukaisesta toimivuudesta ei voitu varmistua. Näin ollen alkuperäisen rakenteen suhteellinen kosteus nousi tarkasteluissa erittäin korkeaksi ja tulosten perusteella rakenteen homehtumisriski on merkittävän korkea. Lisälämmöneristetyt rakenteet ovat ulkopuolelta vedeneristettyjä. Asianmukaisesti vedeneristetyt lisälämmöneristetyt rakenteet ovat tulosten perusteella rakennusfysikaalisesti toimivia tutkimuksessa käytetyllä tarkasteluajanjaksolla. Molemmin puolin lisälämmöneristetyt rakenteet osalta on kuitenkin huomattavissa, että rakenteen toimivuuden arvioinnin luotettavuuden kannalta tulisi suorittaa lisätutkimuksia. Tutkimustulosten perusteella tarkastelluista rakenteista toimivimpana ja näin myös suositelluimpana ratkaisuna voidaan pitää ulkopuolelta lisälämmöneristetty ratkaisua.

Avainsanat: lisälämmöneristäminen, maanvastaiset rakenteet, kellarin seinä, rakennusfysikaalinen mallintaminen, Delphin, Suomalainen homemalli

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
1.1 Tutkimuksen tausta .....	1
1.2 Tutkimuksen esittely .....	1
2. TEORIA .....	3
2.1 Lämmön siirtyminen rakenteissa .....	3
2.1.1 Johtuminen .....	3
2.1.2 Säteily .....	4
2.1.3 Konvektio .....	4
2.2 Kosteuden siirtyminen rakenteissa .....	5
2.2.1 Ilman kosteus .....	5
2.2.2 Materiaalin kosteus .....	5
2.2.3 Diffuusio .....	6
2.2.4 Konvektio .....	7
2.3 Laskentaohjelmisto .....	7
2.4 Homeindeksi .....	8
3. MAANVASTAISET SEINÄRAKENTEET .....	11
3.1 Alkuperäinen rakenne .....	11
3.2 Eristetty rakenne .....	12
4. LASKENTA .....	14
4.1 Lähtötiedot .....	14
4.2 Rakenteen mallintaminen .....	15
5. TULOKSET .....	18
5.1 Alkuperäinen rakenne .....	18
5.2 Molemmin puolin lisälämmöneristetty rakenne .....	20
5.3 Ulkopuolelta lisälämmöneristetty rakenne .....	22
6. YHTEENVETO .....	25
LÄHTEET .....	27
LIITE A: LASKENNASSA KÄYTETYT MATERIAALIOMINAISUUDET	
LIITE B: LÄMPÖTILA JA SUHTEELLINEN KOSTEUS TARKASTELUPISTEISSÄ	

# 1. JOHDANTO

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Energiatehokkuuden merkitys rakentamisessa on muuttunut vuosien saatossa. Rakennusten terveellisyyden, taloudellisuuden sekä käyttömukavuuden lisääminen ovat usein lähtökohtia rakennusten energiatehokkuuden parantamisessa. Lainsäädännön vaatimukset energiatehokkuudesta on asetettu koskemaan myös korjausrakentamista. (RIL 255 2014, s. 237) Korjausrakentamiskohteissa energiatehokkuutta voidaan parantaa esimerkiksi lisälämmöneristämällä.

Rakenteiden lisälämmöneristäminen saattaa tulla kyseeseen myös olemassa olevien rakenteiden ja tilojen korjaustoimenpiteiden tai muutostöiden yhteydessä. Usein korjaustoimenpiteisiin ryhdytään rakenteissa tai tiloissa ilmenneiden ongelmien vuoksi. Ongelmia voivat olla esimerkiksi heikentynyt sisäilman laatu tai näkyvät kosteusvauriot pintarakenteissa. Ympäristöministeriön asetuksessa 4/13 (2013) rakennuksen energiatehokkuuden parantamisesta korjaus- ja muutostöissä on asetettu luvanvaraisiin korjaus- tai muutostoimenpiteisiin ryhtyvälle vaatimus selvittää rakennuksen energiatehokkuutta parantavia toimenpiteitä, vaikka ensisijaisesti toimenpiteisiin ryhdyttäisi muista syistä. Kuitenkin tilanteissa, joissa energiatehokkuutta parantavat toimenpiteet eivät ole teknisesti, taloudellisesti tai toiminnallisesti perusteltuja, toimenpiteitä ei ole välttämätöntä toteuttaa (RIL 249 2015, s. 26).

Lisälämmöneristämässä rakenteen lämpö- ja kosteustekninen käyttäytyminen muuttuu. Eritoten riskirakenteiksi luokiteltujen rakenteiden kohdalla lisälämmöneristämisen vaikutukset tulee selvittää, sillä kohteeseen ja olosuhteisiin sopimattomat ratkaisut voivat aiheuttaa vakaviakin ongelmia tulevaisuudessa.

## 1.2 Tutkimuksen esittely

Tutkimuksessa tarkastellaan tietokoneavusteista mallinnusta hyödyntäen jälleenrakennusajalla tyypillisesti käytettyjä, nk. rintamamiestalojen maanvastaisia säästöbetonisia kellarin seinärakenteita sekä niiden lisälämmöneristysratkaisujen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa maanpinnan taso huomioiden. Tarkasteltavat rakenteet valitaan kirjallisuusselvityksen perusteella vastaamaan aikakaudelle tyypillisiä tai suositeltuja toteutusratkaisuja. Työn tarkoituksena on selvittää lisälämmöneristetyin rakennetyypin lämpö- ja

kosteusteknisen toimivuuden edellytyksiä. Lisäksi tutkimuksessa arvioidaan rakenneratkaisujen homehtumisriskiä erikseen määritetyissä olosuhteissa.

Tutkimuksen teoriaosuudessa selvitetään rakenteiden rakennusfysikaalisen toiminnan perusteita sekä laskennan toimintaperiaatteita. Rakenteen laskentamallin laatimista, käytettyjä materiaali- ja olosuhdeparametrejä sekä tehtyjä oletuksia taustoitetaan laskentaosuudessa. Laskennan tuottamien tulosten perusteella arvioidaan rakenneratkaisujen toimivuutta määritetyissä olosuhteissa.

## 2. TEORIA

### 2.1 Lämmön siirtyminen rakenteissa

Lämpö on aineen kyky tehdä työtä sisäisen energiansa perusteella eli tarkemmin siirtymistilassa olevaa sisäenergiaa. Aineen sisäisellä energialla tarkoitetaan tyypillisesti aineen molekyylien liike-energiaa: etenevää liikettä tai värähtelyä. Lämpötilaerojen tasoittumispyrkimys liittyy oleellisesti lämmön olemukseen. (RIL 117 1979, s. 46)

Lämmön siirtymistä kahden kappaleen tai tilan välillä voi tapahtua johtumalla, säteilemällä tai konvektion avulla. Aineen kykyä siirtää lämpöä kuvataan lämmönjohtavuudella  $\lambda$ , jonka yksikkö on  $W/(mK)$ . Rakenteiden suunnittelussa lämmön siirtymistä, lämpövirtaa, pyritään rajoittamaan erilaisilla materiaalivalinnoilla ja rakenneratkaisuilla. Rakenteen lämpövastus voidaan määrittää lämmönjohtavuuden ja rakenteen paksuuden avulla. Yksittäisen rakennekerroksen lämpövastus saadaan jakamalla kerroksen vahvuus lämpövirran suunnassa aineen lämmönjohtavuudella. Kerroksellisessa rakenteessa koko rakenteen lämpövastus lämpövirran suuntaan on yksittäisten rakennekerrosten lämpövastusten summa. (Siikanen 2014, s. 40–51)

Rakenteen lämpövastus ilmoitetaan tasa-aineista kerrosta kohti. Usein eristetyissä rakenteissa kuitenkin on epäjatkuvuuskohtia, kylmäsiltoja, joissa lämmönjohtavuus on ympäristöä merkittävästi suurempi. Kylmäsiltojen muodostavat ympärilleen moniulotteisen lämpökentän, minkä vuoksi lämpötekniisessä laskennassa on yksinkertaisempaa määrittellä kylmäsiltoille erillinen, kylmäsiltojen vaikutusalasta riippumaton lisäkonduktanssi, joka ilmoittaa kylmäsiltojen kautta aiheutuvan lämpövirran lisäyksen rakenteen kokonaislämpövirtaan. (Björkholtz 1997, s. 19–22)

#### 2.1.1 Johtuminen

Lämmön eri siirtymismuodoista yksinkertaisin on johtuminen. Johtumisessa kiinteiden aineiden ja nesteiden lämpötilaerot pyrkivät tasoittumaan aineen molekyylien liike-energian siirtyessä molekyylien välisten törmäysten vaikutuksesta (Siikanen 2014, s. 40).

Vesi johtaa tehokkaasti lämpöä, minkä vuoksi vedelläkyllystymisasteen kasvaessa materiaalin lämmönjohtavuus kasvaa. Materiaaliin sitoutuneen veden vaikutus on merkittävä etenkin huokoisissa materiaaleissa, joissa lämpöenergian johtuminen kiinteään aineen välityksellä on usein vähäistä. (RIL 117 1979, s. 55)

### 2.1.2 Säteily

Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella, luovuttavat ympäristöönsä energiaa sähkömagneettisen säteilyn, lämpösäteilyn välityksellä (Siikainen 2014, s. 40). Kappaleen kykyä luovuttaa energiaa pinnoiltansa lämpösäteilynä kuvataan emissiviteetillä. Emissiviteetti määritetään tarkasteltavan kappaleen pinnan säteilytehon ja ns. mustan kappaleen pinnan säteilytehon suhteena. Lämpösäteilyn teho kasvaa kappaleen lämpötilan kasvaessa. (Björkholtz 1997, s. 12)

Tyypillisesti lämpösäteily jaotellaan sen aallonpituuden mukaisesti pitkä- ja lyhytaaltoiseen lämpösäteilyyn. Pitkäaaltoista lämpösäteilyä lähettävät kaikki kappaleet, joiden lämpötila poikkeaa absoluuttisesta nollapisteestä. Aurinko lähettää korkean lämpötilansa vuoksi myös lyhytaaltoista lämpösäteilyä. (RIL 255 2014, s. 391)

Lämpösäteilyn vaikutus tarkasteltavaan materiaaliin riippuu materiaalin pinnan ominaisuuksista. Pinta voi heijastaa, absorboida tai läpäistä siihen kohdistuvaa lämpösäteilyä. Rakennussuunnittelussa pinnan absorptiokyvyn voidaan olettaa vastaavan pinnan emissiviteettiä. (Björkholtz 1997, s. 13)

### 2.1.3 Konvektio

Lämpö voi siirtyä myös jonkin väliaineen, kaasun tai nesteen, virtauksen mukana. Kiinteän pinnan ja sen ohi virtaavan väliaineen välinen lämpötilaero aikaansaa lämmön siirtymistä kiinteän pinnan ja väliaineen välillä. (RIL 117 1979, s. 47)

Tällöin kyse on konvektiosta, joka voidaan jakaa virtauksen syntyvän perusteella luonnolliseen ja pakotettuun konvektioon. Luonnollisessa konvektiossa tarkasteltavassa tilassa olevan kaasun tai nesteen sisäisistä lämpötilaeroista aiheutuvat tiheyden muutokset synnyttävät luonnollista virtausta kevyemmän aineen noustessa ylöspäin. Pakotetussa konvektiossa puolestaan virtaus on ulkoisen paine-eron, tyypillisesti tuulenpaineen, aiheuttamaa virtausta. (Björkholtz 1997, s. 13)

Materiaalin rajapinnoilla väliaineen virtausnopeus laskee nolnaan, jolloin seisova ilma vastustaa lämmön virtausta. Tätä kutsutaan pintavastukseksi. Pintavastuksen suuruutta on usein hankalaa arvioida, sillä se on riippuvainen useasta eri muuttujasta. Näin ollen suunnittelussa huomioonotettava materiaalin pintavastus on sekä pinnan että lämpövirran suunnasta riippuva arvio pintavastuksen suuruudesta. (RIL 117 1979, s. 47–51)

## 2.2 Kosteuden siirtyminen rakenteissa

Rakennusfysikaalisessa tarkastelussa kosteudella tarkoitetaan tilanteesta tai ilmiöstä riippuen joko vettä tai vesihöyryä (Björkholtz 1997, s. 52; Siikanen 2014, s. 66). Kosteuspitoisuus ilmoitetaan veden tai vesihöyryn massan suhteena kuivan materiaalin tilavuuteen ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ). Vaihtoehtoisesti kosteuspitoisuus voidaan myös ilmoittaa kilogrammoina vettä tai vesihöyryä kuivaa materiaalikiloa kohti ( $\text{kg}/\text{kg}$  tai paino-%).

Rakenteissa kosteus voi siirtyä joko vesihöyrynä tai vetenä. Liikkeen syntymiseksi tarvitaan kuitenkin aina jokin potentiaali, yleensä paine- tai lämpötilaero (Björkholtz 1997, s. 52).

### 2.2.1 Ilman kosteus

Kaikki vedenpinnan yläpuoliset rakenteet ovat kosketuksissa ilman kanssa. Lisäksi suurin osa rakennusmateriaaleista ovat huokoisia, ja niiden huokosissa on ilmaa. (Björkholtz 1997, s. 43) Rakennusfysiikassa tyypillisesti puhuttaessa ilmasta tarkoitetaan vesihöyryn ja kuivan ilman seosta.

Ilman sisältämä kosteus ilmoitetaan usein suhteellisena kosteutena (% RH). Suhteellinen kosteus on ilman sisältämän absoluuttisen vesihöyrypitoisuuden suhde kyseisessä lämpötilassa olevan ilman enimmäisvesihöyrypitoisuuteen. Enimmäisvesihöyrypitoisuudesta käytetään myös termiä kyllästyskosteus, ja se on sitä suurempi, mitä korkeampi ilman lämpötila on.

Vesihöyryn tiivistymistä vedeksi tapahtuu, kun suurin mahdollinen ilman sisältämä vesihöyry määrä ylittyy joko absoluuttisen kosteuden lisääntyessä tai vaihtoehtoisesti lämpötilan laskiessa. Kerroksellisissa rakenteissa lämpötilaero rakennekerroksen pintalämpötilan ja sitä ympäröivän ilman välillä voi aiheuttaa vesihöyryn tiivistymistä kylmälle pinnalle. Tiivistymistä voidaan ehkäistä rajoittamalla vesihöyryn tunkeutumista rakenteeseen erillisellä höyrynsulkukerroksella tyypillisesti rakenteen lämpimällä puolella (Siikanen 2014, s. 72).

### 2.2.2 Materiaalin kosteus

Huokoisissa materiaaleissa voi esiintyä kosteutta eri tavoin sitoutuneena vetenä tai vesihöyrynä. Materiaaliin sitoutunut kosteus ilmoitetaan tyypillisesti paino-osuutena materiaalin kuivapainosta tai kuivatilavuudesta (Siikanen 2014, s. 77). Materiaalin kosteus voidaan myös ilmaista huokosilman suhteellisena kosteutena.



Kosteuden siirtymistä huokoiseen materiaaliin kuvataan materiaalin hygroskooppisuudella ja kapillaarisuudella. Hygroskooppisuudella tarkoitetaan materiaalien kykyä sitoa itseensä kosteutta ilmasta sekä luovuttamaan kosteutta ilmaan. Kapillaarisuudella puolestaan kuvataan materiaalin kykyä absorboida vettä itseensä vapaasta veden pinnasta sekä kykyä siirtää vettä huokosrakenteessaan. Kapillaarisuus perustuu pääsääntöisesti veden pintajännitysvoimien luomaan materiaalin huokosalipaineeseen, joka pyrkii tasoittumaan materiaaliin kosketuksissa olevan veden paineen kanssa.

Tarkasteltavan materiaalin kosteuspitoisuutta tilanteessa, jossa kosteutta ei siirry materiaalin ja sen ympäristön välillä kutsutaan tasapainokosteudeksi. Kosteuden siirtymistavan perusteella voidaan erottaa materiaalin hygroskooppinen ja kapillaarinen tasapainokosteus sen perusteella, onko materiaali kosteustasapainossa ilman suhteellisen kosteuden kanssa vai vapaan veden pinnan kanssa (RIL 117 1979, s. 104–105). Todellisuudessa puhtaan hygroskooppisen kosteustasapainon saavuttaminen on haasteellista, sillä kosteuspitoisuuden kasvaessa materiaalin huokosissa tapahtuu kosteuden tiivistymistä vedeksi, jolloin siirrytään kosteuspitoisuuden kapillaariselle alueelle.

Materiaalin hygroskooppisuus vaikuttaa merkittävästi rakenteen käyttäytymiseen kosteusrasituksen muuttuessa. Voimakkaasti hygroskooppisilla materiaaleilla, esimerkiksi puulla, on moninkertainen kyky sitoa kosteutta itseensä esimerkiksi mineraalivilloihin verrattuna. Tällöin kosteusrasituksen kasvaessa vähemmän hygroskooppisilla materiaaleilla suhteellinen kosteus nousee merkittävästi nopeammin verrattuna voimakkaasti hygroskooppisiin materiaaleihin (Ympäristöopas 2016, s. 105). Rakenteen korkeasta hygroskooppisesta kosteuskapasiteetista on hyötyä rakenteen toimivuuden kannalta muuttuvissa ympäristöolosuhteissa, sillä se tasaa vesihöyryn muodossa liikkuvan kosteuden kulkeutumista rakenteen läpi (Siikanen 2014, s. 79).

### **2.2.3 Diffuusio**

Vesihöyryn diffuusiosta kahden tarkasteltavan tilan välillä vallitseva vesihöyrypitoisuusero pyrkii tasoittumaan vesihöyryn virratessa suuremmasta konsentraatiosta pienempään. Diffuusion potentiaalina toimii siis rakenteen eri puolilla vallitseva vesihöyrypitoisuus, tarkemmin vesihöyryn osapaine. Lämmin ilma sisältää usein enemmän vesihöyryä, jolloin diffuusiolla kosteus virtaa rakenteissa lämpimästä tilasta kylmään tilaan.

Lähes kaikki materiaalit läpäisevät jonkin verran vesihöyryä. Tietyn paksuisen materiaalikerroksen kykyä vastustaa vesihöyryn virtausta, diffuusiota, kuvataan vesihöyrynvas-

tuksella. Vesihöyrynvastus on etenkin puupohjaisilla materiaaleilla voimakkaasti riippuvainen ympäröivän ilman suhteellisesta kosteudesta, vesihöyrynvastus voi heiketä moninkertaisesti ilman suhteellisen kosteuden kasvaessa. (Siikanen 2014, s. 72–74)

Vesihöyryn liiallista siirtymistä rakenteeseen ja siitä mahdollisesti syntyviä kosteusvaurioita usein pyritään rajoittamaan materiaalivalinnoilla. Kosteusvaurioita syntyy usein tilanteessa, jossa diffuusiovirtaus rakenteeseen on suurempi, kuin siitä poistuva diffuusiovirtaus (RIL 250 2020, s. 107).

Vesihöyryn siirtyminen materiaalikerroksen läpi todellisuudessa ei välttämättä tapahdu puhtaan diffuusion avulla. Etenkin huokoisissa materiaaleissa kosteus voi liikkua materiaalikerroksen sisällä kapillaarisesti. (Siikanen 2014, s. 71).

### **2.2.4 Konvektio**

Kosteus voi siirtyä vesihöyrynä myös ilmavirtauksen mukana, konvektiolla. Konvektion potentiaalina toimii ilmanpaine-erot rakenteen eri puolilla. Lämpötilaerot sekä tuuli ja ilmanvaihto ovat tyypillisiä ilmanpaine-erojen aiheuttajia. Konvektiota voi esiintyä myös rakenteen sisäisenä konvektiona ilman tiheyserojen vaikutuksesta.

Konvektion avulla voi siirtyä merkittäviäkin määriä kosteutta rakenteen ilmanpitävyyden ollessa puutteellinen. Etenkin kylmänä vuodenaikana rakenteen epätiiviyiskohtien läpi kulkevat konvektion avulla siirtyvät kosteusmäärät voivat olla moninkertaisia diffuusiovirtaan verrattuna. Toisaalta konvektiolla voi olla rakenteelle myös kuivaava vaikutus ilman virratessa kylmästä lämpimään, sillä ilman lämmitessä sen kyky sitoa kosteutta kasvaa (Björkholtz 1997, s. 58).

## **2.3 Laskentaohjelmisto**

Rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa, lämmön-, ilman- ja kosteudensiirtoon liittyviä ilmiöitä ja niiden vaikutusta voidaan mallintaa rakennusfysikaalisissa laskentatarkasteluissa. Laskentatarkastelujen tarkoituksena on tuottaa numeroarvoja rakenteen rakennusfysikaalisesta toiminnasta rakenteiden mitoituksen ja toiminnan suunnittelun tueksi. Laskennalliseen mallinnukseen liittyy usein haasteita, mutta kehittyneet tutkimus- ja laskentamenetelmät ovat nostaneet laskentatarkastelujen asemaa rakenteiden rakennusfysikaalisessa suunnittelussa. (RIL 255 2014, s. 54–57)

Tässä työssä tarkasteltavien rakenteiden rakennusfysikaalinen mallinnus ja laskenta toteutetaan Dresdenin teknillisen yliopiston (Technische Universität Dresden) kehittämällä Delphin-ohjelmistolla. Delphin on numeerinen lämpö- ja kosteuslaskelmaohjelmisto, jolla

voidaan mallintaa yksi- ja kaksiulotteisia sekä pyörähdyssymmetrisiä kolmiulotteisia rakenteita stationäärisissä tai epästationäärisissä olosuhteissa. Laskentaohjelmisto kykenee lisäksi tarvittaessa simuloimaan haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) ja suolojen siirtymistä rakenteessa sekä huomioimaan painovoiman ja konvektion vaikutuksen laskennassa.

Laskennassa tutkittava rakenne jaetaan suorakulmisiin laskentaelementteihin, joissa vallitsee lämpö- ja kosteustasapaino. Lämmön- ja kosteuden siirtyminen tapahtuu elementtien rajapintojen kautta ja tästä syystä laskennan tarkkuus paranee elementtijaon tihentyessä. Toisaalta tiheämpi elementtijako kasvattaa laskentaan kuluva aikaa. Laskentatarkkuutta laskentaan kuluvan ajan suhteen optimoidaan tyypillisesti käyttämällä mallissa eri kokoisia laskentaelementtejä. Materiaalien välisten rajapintojen sekä mahdollisesti erikseen määritettyjen tarkastelupisteiden läheisyydessä elementtiverkkoa tihennetään ja vastaavasti materiaalikerrosten keskikohdilla elementtiverkkoa harvennetaan. Näin on mahdollista saavuttaa hyvä laskentatarkkuus laskentaan kuluvan ajan kasvamatta tarpeettomasti.

## 2.4 Homeindeksi

Tampereen teknillisen yliopiston ja Teknologian tutkimuskeskus VTT:n yhdessä kehittämä suomalainen homemalli on työkalu homeen kasvun arvioimiseksi eri rakennusmateriaalien pinnalla. Homemallin avulla lasketaan tunnin välein tietyistä tarkastelupisteistä määritettyjen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvojen perusteella homeen kasvun nopeutta kuvaava dimensioton homeindeksi  $M$ , joka vaihtelee välillä 0–6. Homeindeksi kuvaa homeen kasvua materiaalin pinnalla, mutta ei ota kantaa eri homelajien esiintyvyyteen tai mahdollisesti kasvavan homeen toksisuuteen. (RIL 255 2014, s. 60). Homeindeksin  $M$  luokitustasot on esitetty taulukossa 1.

**Taulukko 1.** *Homemallin homeindeksin luokitusastot (RIL 255 2014)*

Homeindeksi M	Havaittu homekasvu	Huomautuksia
0	Ei kasvua	Pinta puhdas
1	Mikroskoopilla havaittava kasvu	Paikoin alkavaa kasvua, muutama rihma
2	Selvä mikroskoopilla havaittava kasvu	Homerihmasto peittää 10 % tutkittavasta alasta (mikroskoopilla), Useita rihmastopesäkkeitä muodostunut
3	Silmin havaittava kasvu Selvä mikroskoopilla havaittava kasvu	Alle 10 % peitto alasta (silmillä) Alle 50 % peitto alasta (mikroskoopilla) Uusia itiöitä alkaa muodostua
4	Selvä silmin havaittava kasvu Runsas mikroskoopilla havaittava kasvu	Yli 10 % peitto alasta (silmillä) Yli 50 % peitto alasta (mikroskoopilla)
5	Runsas silmin havaittava kasvu	Yli 50 % peitto alasta (silmillä)
6	Erittäin runsas kasvu	Lähes 100 % peitto, tiivis kasvusto

Suomalaisessa homemallissa rakennusmateriaalit luokitellaan taulukon 2 mukaisesti neljään eri homehtumisherkkyyssluokkaan HHL. Homehtumisherkkyyssluokka on riippuvainen homeen kasvun nopeudesta sekä homehtumisen maksimitasosta materiaalin pinnalla. Tyypillisesti puupohjaiset materiaalit kuuluvat homehtumisherkkyyssluokkaan HHL1 tai HHL2, muovi- ja mineraalipohjaiset materiaalit luokkaan HHL3 tai HHL4. Kahden eri materiaalin välisessä rajapinnassa homehtumisriskiä tarkastellaan tyypillisesti herkemmin homehtuvan materiaalin mukaan.

**Taulukko 2.** *Rakennusmateriaalien luokittelu homehtumisherkkyyssluokkiin (RIL 255 2014.)*

Homehtumisherkkyyssluokka	Rakennusmateriaali
Hyvin herkkä HHL1	Karkeasahattu ja mitallistettu puutavara (mänty- ja kuusi), höylätty mänty
Herkkä HHL2	Höylätty kuusi, paperipohjaiset tuotteet ja kalvot, puupohjaiset levyt, kipsilevy
Kohtalaisen kestävä HHL3	Mineraalivillat, muovipohjaiset materiaalit, kevytbetoni, kevytsorabetoni, karbonatsoitunut vanha betoni, sementtipohjaiset tuotteet, tiilet
Kestävä HHL4	Lasi ja metallit, alkalinen uusi betoni, tehokkaita homesuoja-aineita sisältävät materiaalit

Homemallissa homeen kasvun katsotaan tapahtuvan lämpötilavälillä 0...50 °C suhteellisen kosteuden noustessa riittävän korkealle. Homehtumisherkkyyssluokkien HHL1 ja HHL2 materiaaleilla homeen kasvun katsotaan mahdollistuvan suhteellisen kosteuden ollessa vähintään 80 % RH, homehtumisherkkyyssluokkien HHL3 ja HHL4 materiaaleilla vähintään 85 % RH. Olosuhteiden muuttuessa homeen kasvuille epäedullisiksi homeen kasvu pysähtyy ja materiaalin pinnoilla voi tapahtua homeen taantumista. Herkästi ho-

mehtuvilla materiaaleilla homeen taantuma on voimakkaampaa kuin hyvin hometta kestäville materiaaleilla. (RIL 255 2014, s. 60–63). Homemallin mukaisia homehtumisherkkyysluokkia tyypillisesti vastaavat homeen taantumaluokat on esitetty taulukossa 3.

**Taulukko 3.** *Homehtumisloukkia tyypillisesti vastaavat homeen taantumaluokat (RIL 255 2014)*

<b>Homehtumis-herkkyysluokka</b>	<b>Homeen taantumaluokka</b>
Hyvin herkkä HHL1	Merkittävä taantuma HTL2
Herkkä HHL2	Kohtalainen taantuma HTL3
Kohtalaisen kestävä HHL3	Vähäinen taantuma HTL4
Kestävä HHL4	Vähäinen taantuma HTL4

Suomalaista homemallia on käsitelty tarkemmin esimerkiksi julkaisuissa VTT-TTY homemallin toimintaperiaatteet ja käyttö rakenteiden kosteusteknisen toiminnan tarkasteluissa (Vinha et al. 2013) sekä Homeen kasvu seinärakenteissa laboratorio- ja kenttäkokeissa (Lähdesmäki et al. 2009).

### 3. MAANVASTAISET SEINÄRAKENTEET

Rakennusfysikaalisesti maanvastaisen seinän toimivin rakenneratkaisu on ns. käännetty rakenne. Käännettyssä seinärakenteessa vedeneristys sijaitsee kantavan rakennekerroksen ulkopinnassa ja lämmöneriste uloimpana rakennekerroksena. Käännettyssä seinärakenteessa ulkopuolinen vedeneriste tyypillisesti toimii myös ilmansulkuna. (Weijo et al. 2019, s. 44–45)

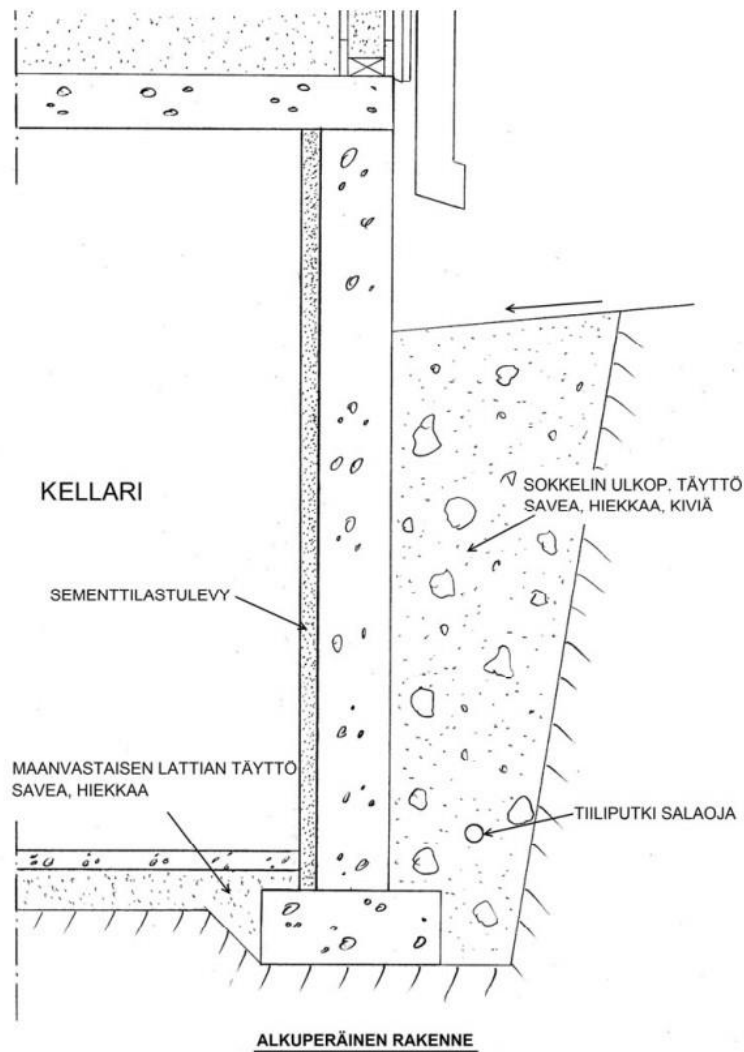
Rakennuspohjan ja vierustäytön toimivan ja tehokkaan kuivatuksen yhteydessä kantavan rakenteen ulkopuolisena vedeneristykseenä voidaan käyttää epäjatkuvia vedeneristeitä, kuten perusmuurilevyjä. Jatkuva vedeneristys, esimerkiksi bitumikermieristys, voi tulla kyseeseen tilanteissa, joissa rakennuspohjan riittävää kuivatusta ei voida varmistaa tai rakennuspohja sisältää terveydelle haitallisia yhdisteitä. Lisäksi korkea pohjaveden pinnan taso voi edellyttää jatkuvaa vedeneristystä. (RIL 107 2012, s. 54–55)

Rakenteen ulkopuolista tiivistä vedeneristystä käytettäessä tulee rakenteen sisäpinta jättää vesihöyryavoimeksi, jotta rakenteen kuivuminen on mahdollista. Märkätilojen sijoituksessa kellarin maanvastaiselle seinälle tulee märkätilan kohdalla seinärakenteen toiminta erikseen varmistaa. Pääsääntönä kuitenkin kantavan seinärakenteen jättämistä kahden vedeneristyskerroksen väliin tulee välttää.

#### 3.1 Alkuperäinen rakenne

Rakenteiden lisälämmöneristys tulee usein kyseeseen korjaustoimenpiteiden yhteydessä. Korjaustoimenpiteisiin ryhdytään tyypillisesti rakenteessa havaittujen vaurioiden tai niistä aiheutuvien haittojen perusteella. Itä-Suomen yliopiston julkaisemassa Jälleenrakennuskauden pientalon korjausoppaassa (Karjalainen & Riippa 2010) on esitetty Hengitysliitto Heli ry:n korjausneuvonnan tutkimus- ja korjauskohteiden perusteella jälleenrakennuskauden pientalojen tyypillisiä riskiratkaisuja ja yleisiä vauriokohteita.

Tyypillinen lähtötilanne kellarin maanvastaisen seinärakenteen korjaustoimenpiteelle on sisäpuolelta sementtilastulevyeristeellä lämmöneristetty betoniseinä. Rakenteen vedeneristys on usein toteutettu sisäpuolisella bitumisivelyllä, mutta vedeneristyksen toiminnallisuus on usein ajan myötä heikentynyt merkittävästi. Ulkopuolista vedeneristystä ja salaojia ei välttämättä ole ollenkaan sekä rakenteen vierustäyttö on usein voimakkaasti kapillaarinen, jolloin rakenteen ulkopuolinen kosteusrasitus voi olla merkittävä. Alkuperäinen rakenneratkaisu on esitetty kuvassa 1.



*Kuva 1. Alkuperäinen rakenneratkaisu (Karjalainen & Riippa 2010, s. 19)*

### 3.2 Eristetty rakenne

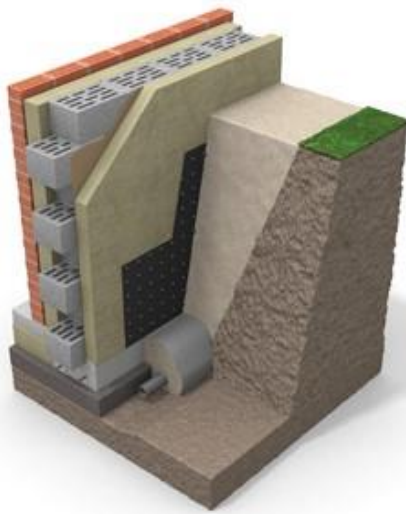
Maanvastaisten seinärakenteiden ulkopuolinen lisälämmöneristys vaatii rakennuksen vierustan ylös kaivamista, jolloin salaojien uusimisen yhteydessä on hyvä selvittää ulkopuolisen lisälämmöneristykseen tarpeellisuutta.

Ulkopuolisena lisälämmöneristeenä tyypillisesti suositellaan käyttämään EPS- tai XPS-eristeitä niiden hyvän kosteudenkeston vuoksi. Myös jäykän mineraalivillan käyttö ulkopuolisena lämmöneristeenä on mahdollista. Suuremman huokoisuutensa vuoksi se on kuitenkin herkempi kosteuden vaikutuksille.

Työssä tarkasteltavan rakenteen pohjana on kuvan 2 mukainen Parocin materiaaleissa esitetty erimerkkiratkaisu maanvastaisten kellarin seinien lisälämmöneristämisestä. Parocin esittämä ratkaisu on molemmin puolin mineraalivillaeristetty ratkaisu sisäpuolisella

verhomuurauksella. Sisäpuolinen lämmöneristys maanvastaisissa rakenteissa on kosteusteknisesti kuitenkin haasteellinen ja vaatii huolellista suunnittelua etenkin rakenteen riittävän tiivyyden varmistamiseksi. Tämän vuoksi tarkastellaan edellä mainitun ratkaisun lisäksi vastaavaa rakennetta ilman sisäpuolisia rakennekerroksia.

Kantavan seinärakenteen ulkopinnan ja mineraalivillaeristeen väliin asennetaan jatkuva vedeneristyskerros, jolla rajoitetaan kosteuden siirtymistä rakenteen läpi. Vedeneristyskerroksen pohjatyöt on tehtävä huolella, jotta vedeneristeen kiinnittyminen voidaan varmistaa. Mineraalivillaeristeen ulkopintaa vasten asennetaan patolevy, jolla rajoitetaan veden ja epäpuhtauksien kulkeutumista vierustäytöstä eristekerrokseen.



- Hyvin vettä läpäisevä soratäyte
- Vesitiivis kerros, Patolevy (tai vastaava)
- Ulkopuolella: lämmöneriste: **ROS 30**
- Bitumiliuossively ja bitumikermi valmistajan ohjeiden mukaisesti
- Kantava rakenne: muurattu tai betoninen seinä
- Sisäpuolella: lämmöneriste **PAROC eXtra**
- Verhomuuraus
- Pintamateriaali

**Kuva 2.** Esimerkkiratkaisu kellarin seinien lisälämmöneristämisestä (Paroc 2021)



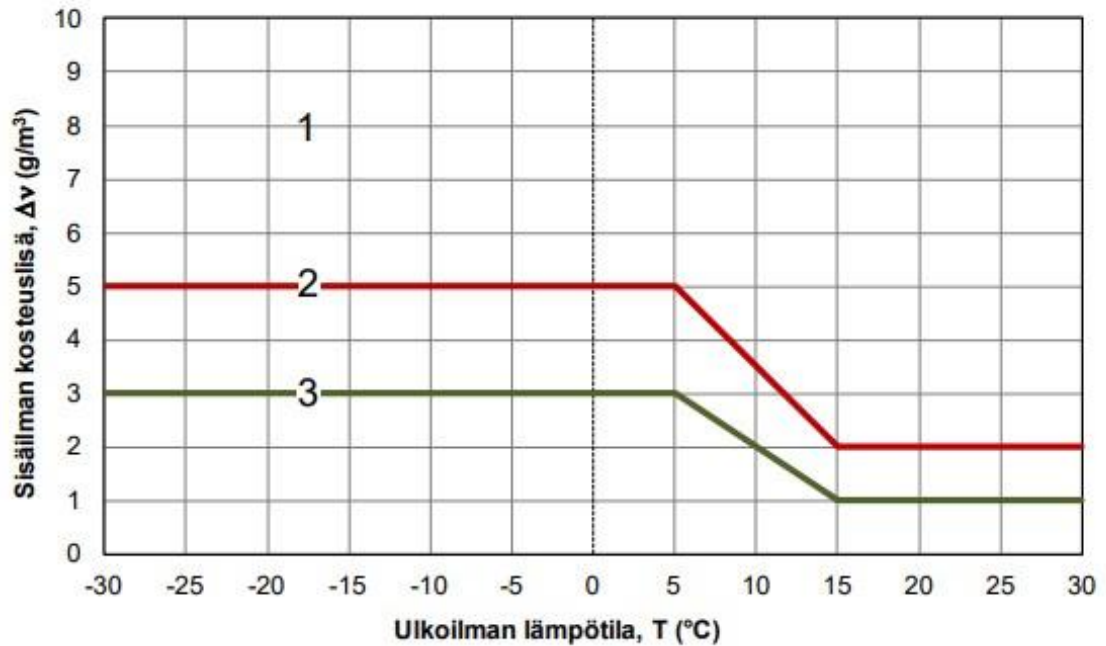
## 4. LASKENTA

### 4.1 Lähtötiedot

Ellei toisin määritetä, laskentaohjelmiston lähtötilanteessa kunkin materiaalin suhteellisen kosteuden oletetaan olevan 80 % RH ja lämpötilan 20 °C. Maaperän osalta kuitenkin lähtötilanteen oletusolosuhteita muutettiin, sillä maamateriaalin lämpötilan ja suhteellisen kosteuden muutokset tapahtuvat muuhun rakenteeseen verraten hitaasti ja näin tarkasteluajanjakson pituutta olisi pitänyt kasvattaa. Lisäksi maaperässä on käytännössä aina niin paljon kosteutta tarjolla, että suhteellinen kosteus on liki 100 % RH (RIL 255 2014, s. 72–73). Laskennan lähtötilanteessa maaperän lämpötilaksi oletettiin 7 °C ja suhteelliseksi kosteudeksi 95 % RH.

Homehtumisriskitarkastelussa suositeltu tarkasteluajanjakso on vähintään yksi vuosi, mutta tulosten tarkkuuden parantamiseksi on suositeltua tarkastella toimintaa pidemmällä ajanjaksolla (RIL 255 2014, s. 83–84). Etenkin lisäeristettyjen rakenteiden osalta laskentaan kuluva aika venyi pitkäksi, joten laskenta-ajan kohtuullistamiseksi tarkasteluajanjakson pituudeksi päädyttiin valitsemaan kaksi vuotta.

Tarkasteluolosuhteet valittiin vastaamaan yleisesti käytettyjä TTY:n ja Ilmatieteen laitoksen kanssa yhteistyössä määritettyjä rakennusfysikaalisia testivuotia. Tarkastelut suoritettiin Vantaan 2007 ulkoilman olosuhteissa. Vantaan ilmasto-olosuhteet soveltuvat rakennusfysikaaliseen tarkasteluun rakenteilla, joiden kosteustekniseen toimintaan vaikuttaa sekä ulkoilman suhteellinen kosteus että sade. (RIL 255 2014, s. 67–72). Sisäilman olosuhteet valittiin vastaamaan RIL 107:ssä (2012) esitettyjä mitoitusolosuhteita. Sisäilman lämpötilaksi oletettiin 21 °C ja kosteuslisäksi kosteusluokan 2 mukaista mitoitusarvoa. Kosteuslisän riippuvuus ulkoilman lämpötilasta on esitetty kuvassa 3.

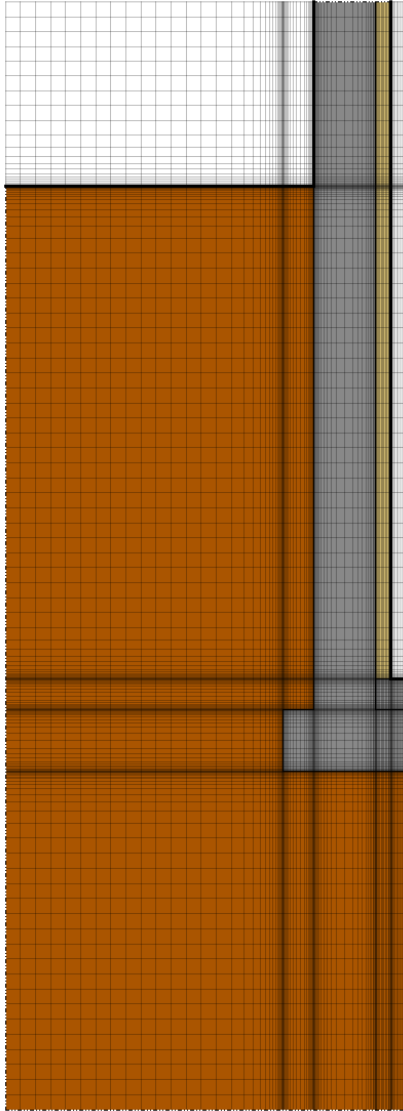


**Kuva 3.** Sisäilman suhteellisen kosteuslisän mitoitusarvot (RIL 107 2012)

Yksityiskohtaisia tietoja eri rakennusmateriaalien lämpö- ja kosteusteknisestä käyttäytymisestä on saatavilla rajoitetusti. Rakennusratkaisujen materiaalivalintoja ei tästä syystä yksilöity, vaan materiaalivalinnat tehtiin vastaamaan ominaisuuksiltaan yleisesti käytettyjä materiaaleja vastaavia Delphin-ohjelmiston materiaalikirjastoon lisättyjä materiaaleja. Tarkemmat tiedot käytetyistä materiaaleista ja niiden ominaisuuksista löytyy liitteestä A.

## 4.2 Rakenteen mallintaminen

Tarkasteltavien rakennusratkaisujen geometria määriteltiin laskentaohjelmistossa ja geometrian mukaan luotiin laskentaelementtiverkosto. Elementtiverkosto luotiin ohjelmiston automaattisen toiminnon avulla määrittelemällä elementin minimikooksi 1 mm ja maksimikooksi 50 mm. Alkuperäisen rakennusratkaisun elementtijako on esitetty kuvassa 4. Kuvasta on huomattavissa elementtiverkon tihentyminen materiaalien rajapintojen läheisyydessä.



**Kuva 4.** Alkuperäisen rakenneratkaisun elementtijako laskentamallissa

Seinän korkeudeksi valittiin 2,2 m, josta maanpinnan yläpuolista osaa on 0,6 m ja maanvastaista osaa 1,6 m. Laskentamallissa rakennetta ympäröivän perusmaa huomioitiin kolmen metrin syvyydeltä maanpinnan tasosta ja metrin etäisyydellä kantavan rakenteen ulkopinnasta. Lattiarakenteen suojaus kapillaarista kosteuden nousua vastaan oletetaan olevan riittävä, joten lattian alapuolista perusmaata ei huomioitu mallissa. Lisäksi laskennan kannalta mielenkiintoisimpien tarkastelupisteiden arvioitiin sijaitsevan rakenteen yläosassa.

Alkuperäisen rakenneratkaisun lämmöneristekerroksen paksuudeksi oletettiin 50 mm. Lastuvillaeristeen lämmönjohtavuudeksi valittiin Delphin-materiaalikirjaston mukainen 0,06 W/(mK). Ympäristöministeriön asetuksen 4/13 mukainen vaatimus rakenteen U-arvon puolittamisesta täyttyy 100 mm mineraalivillaeristeellä, jonka lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo on enintään 0,045 W/(mK). Mineraalivillaeristekerrosten paksuudeksi

laskentamallissa valittiin 100 mm sekä ulkopuoliselle että sisäpuoliselle lämmöneristeelle.

Lisälämmöneristettyjen rakenteiden osalta rakenteen ulkopuolelle mallinnettiin pystysalaoja kapillaarisen vedensiirron rajoittamiseksi sekä pintavesien poisohjaamiseksi. Pystysalaoja ulotettiin 300 mm etäisyydelle ulkopuolisen eristelevyn ulkopinnasta.

Vedeneriste mallinnettiin kahden rakennekerroksen välisenä rajapintana. Rajapinnan suhteelliseksi diffuusiovastukseksi asetettiin 150 m ja vedenpitävyydeksi  $5 \cdot 10^{17}$  m/s. Näiden arvojen arvioitiin vastaavan 3 mm vahvuista bitumikermivedeneristystä. Vaihtoehdoisesti vedeneriste voidaan mallintaa erillisenä rakennekerroksena, mutta tämän havaittiin vaikuttavan epäedullisesti laskentaan kuluvaan aikaan. Mallinnustapojen toimivuutta vertailtiin yksinkertaisessa yksiulotteisessa mallissa ja mallinnustavalla ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta laskennan tuloksiin, kunhan pintavastus ja ulkoinen kosteusrasitus sijaitsevat eri rajapinnoilla.

Patolevy mallinnettiin vedeneristeen tavoin kahden materiaalin välisenä rajapintana. Rajapinnan vesihöyrynvastus asetettiin vastaamaan yleisesti patolevyjen valmistuksessa käytettävää polyeteeniä. Lisäksi ulkopuolisen lämmöneristeen maanpinnan yläpuoliselle osalle mallinnettiin ulkoverhousrakenteen, sillä lämmöneristeen toiminnan varmistamiseksi se tulee suojata sateen vaikutukselta. Verhousrakenteeksi valittiin kuitusementtilevyverhous 25 mm tuuletusvälillä. Sisäpuolen verhomuuraus oletettiin molemmin puolin lisälämmöneristetyssä rakenteessa tehtävän kevytsoraharkoista.

Laskentaohjelmistossa määritettiin rakenteelle erilaisia tarkastelupisteitä paikallisten lämpö- ja kosteusolosuhteiden sekä homeindeksin tarkastelua varten. Tarkastelupisteitä sijoitettiin jokaisen materiaalikerroksen rajapinnoille eri korkeusasemiin:

- TP A, kellarin seinän yläpää  $h=2,2$  m
- TP B, maanpinnan taso  $h=1,6$  m
- TP C, lattian taso  $h=0$  m

## 5. TULOKSET

Laskennan tuloksista koostetut lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kuvaajat ajan suhteen eri tarkastelupisteissä on esitetty liitteessä B.

Rakenteen terveellisyyden kannalta homeen kasvua materiaalien pinnalla tulee rajoittaa. Käytännössä tämä rajaa homemallin mukaisen homeindeksin välille 0...1. Homekasvuston aineenvaihduntatuotteita voi siirtyä sisäilmaan ilman liikkeiden mukana ja näin heikentää sisäilman terveellisyyttä. Rakenteen ulkopuolella homeen kasvun rajoittaminen saattaa kuitenkin olla haastavaa, jolloin tietyissä olosuhteissa mahdollinen homeen kasvu on vain hyväksyttävä. Tällöin kuitenkin homekasvuston aineenvaihduntatuotteiden siirtymistä sisäilmaan on rajoitettava. (RIL 255 2014, s. 64–65)

### 5.1 Alkuperäinen rakenne

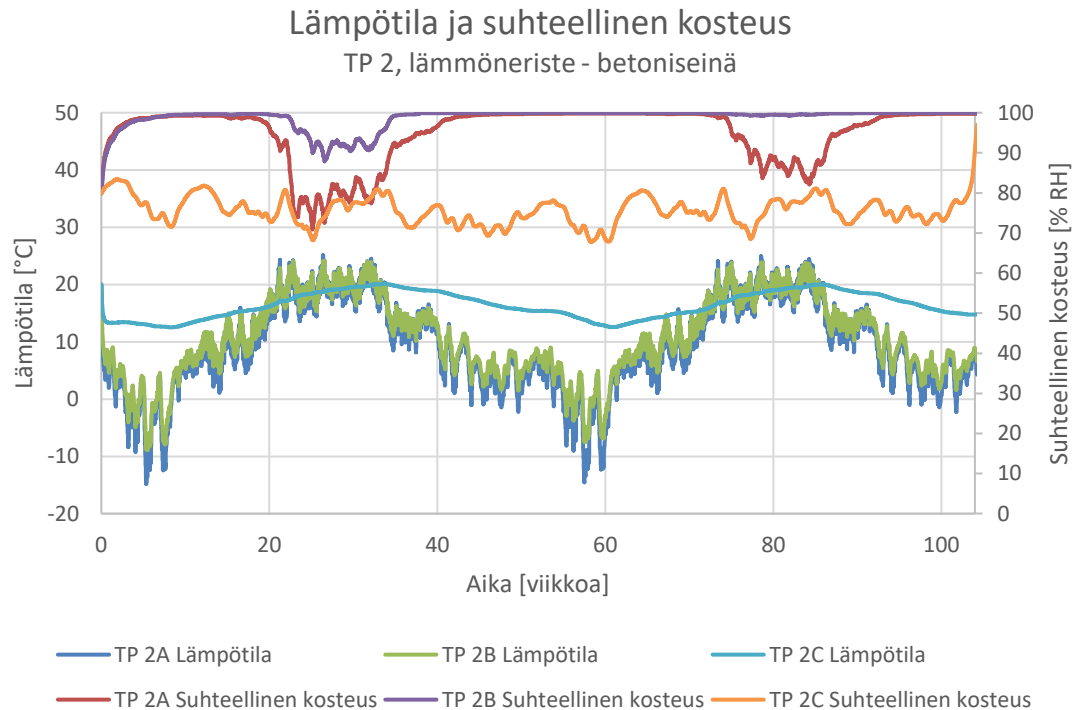
Lisälämmöneristämättömän rakenteen toimintaa tarkasteltiin kolmesta eri tarkastelupisteestä, kutakin kolmelta eri korkeudelta A, B ja C:

- TP 1, sisäpuolisen lämmöneristekerroksen sisäpinta
- TP 2, sisäpuolisen lämmöneristekerroksen ja betoniseinän rajapinta
- TP 3, betoniseinän ulkopinta

Tarkastelupisteessä 1 lämpötila ja suhteellinen kosteus seuraa sisäilman olosuhteita seinän alaosan ollessa hieman viileämpi. Suhteellinen kosteus nousee hetkellisesti yli 80 % RH, mutta pääosin vaihtelee välillä 50...80 % RH. Tarkastelupisteessä 3 ulkoilman olosuhteiden vaikutuksesta betoniseinän ulkopinnassa lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihtelut ovat voimakkaita seinän yläosassa ja maanpinnan tasossa. Maamassan tasatessa lämpötilan ja suhteellisen kosteuden muutoksia seinän alaosassa lämpötila vaihtelee välillä 12...20 °C ja suhteellinen kosteus pääsääntöisesti välillä 78...83 % RH. Tarkasteluajanjakson lopulla suhteellinen kosteus kuitenkin nousee liki 100 prosenttiin.

Homeen kasvulle otollisimmat olosuhteet muodostuvat sisäpuolisen lämmöneristekerroksen ja betoniseinän väliseen rajapintaan tarkastelupisteeseen 2. Seinän alaosassa suhteellisen kosteuden vaihtelut ovat pieniä ja rajoittuvat välille 70...85 % RH lämpötilan ollessa 13...20 °C. Seinän yläosassa suhteellinen kosteus on pääosin liki 100 % pois lukien kesäkausi, jolloin suhteellinen kosteus laskee välille 75...90 % RH. Maanpinnan tasolla tarkastelupisteessä suhteellinen kosteus vaihtelee välillä 90...100 % RH. Sekä seinän yläosassa että maanpinnan tasolla tarkastelupisteen 2 lämpötila vaihtelee välillä

-15...25 °C. Lämpötila pysyttelee 0 °C:n yläpuolella suurimman osan vuodesta, jolloin muodostuu homeen kasvulle otolliset olosuhteet. Tarkastelupisteen 2 lämpötila ja suhteellinen kosteus ajan suhteen on esitetty kuvassa 5.

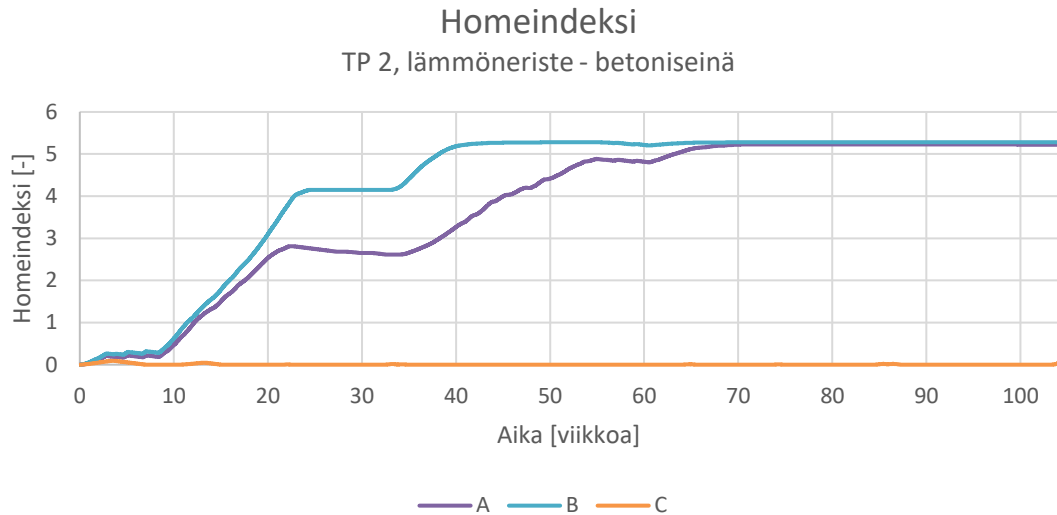


**Kuva 5.** Lämpötila ja suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä 2

Rakenteen merkittävin homehtumisriski syntyy kantavan rakenteen ja lastuvillaeristeen väliseen rajapintaan maanpinnan tasossa sekä sen yläpuolisessa osassa. Betoniseinän ja lastuvillaeristeen rajapinnassa homeindeksin enimmäisarvo on 5,28 maanpinnan tasossa ja 5,23 seinän yläosassa, mikä tarkoittaa homeindeksiluokituksen mukaan runsasta silmin havaittavaa kasvustoa suurimmassa osassa tarkasteltavaa pintaa. Enimmäisarvo saavutetaan jo tarkasteluajanjakson ensimmäisen vuoden loppupuolella, minkä jälkeen homeindeksin kehityksessä ei tapahdu havaittavaa muutosta. Homeindeksin enimmäisarvot tarkastelupisteissä on esitetty taulukossa 4 ja homeindeksin kehittyminen ajan suhteen on esitetty kuvassa 6.

**Taulukko 4.** Homeindeksit tarkastelupisteissä rakennekerroksittain eri korkeusasemissa

Tarkastelupiste	Homehtumis-herkkyyssluokka	A	B	C
TP 1, lämmöneristeen sisäpinta	2	0,08	0,09	0,34
TP 2, lämmöneriste-betoniseinä	2	5,23	5,28	0,10
TP 3, betoniseinän ulkopinta	3	0,03	1,51	0,24



*Kuva 6. Homeindeksi betoniseinän ja lastuvillaeristeen rajapinnassa*

## 5.2 Molemmin puolin lisälämmöneristetty rakenne

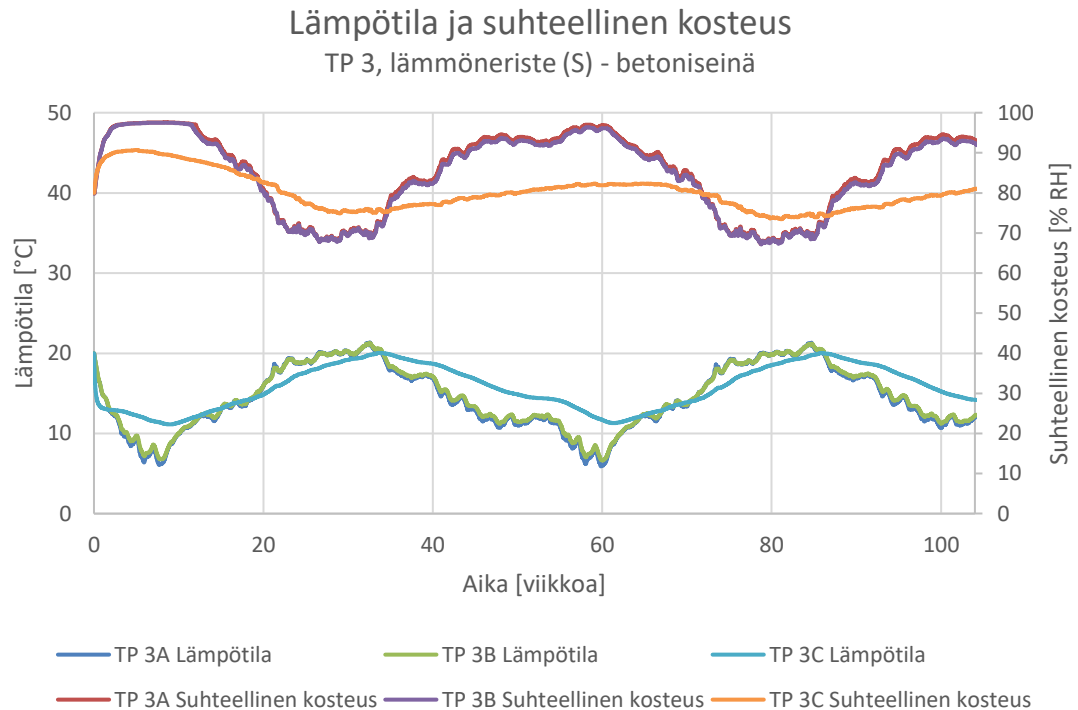
Rakenteen toimintaa tarkasteltiin kustakin aiemmin määritetystä korkeusasemasta kuu-  
desta eri tarkastelupisteestä:

- TP 1, verhomuurauksen sisäpinta
- TP 2, verhomuurauksen ja sisäpuolisen lämmöneristeen välinen rajapinta
- TP 3, sisäpuolisen lämmöneristeen ja betoniseinän välinen rajapinta
- TP 4, betoniseinän ja vedeneristeen välinen rajapinta
- TP 5, vedeneristeen ja ulkopuolisen lämmöneristeen välinen rajapinta
- TP 6, ulkopuolisen lämmöneristeen ulkopinta

Kantavan rakenteen sisäpuolisissa rakennekerroksissa lämpötilan vaihtelut ovat pie-  
nempiä seinän yläosassa lähempänä seinän sisäpintaa ja kasvavat alaosissa lähestyt-  
täessä betoniseinän sisäpintaa. Yläosassa lämpötila vaihtelee välillä 17...21 °C ja ala-  
osassa välillä 12...21 °C. Suhteellisen kosteuden vaihtelut sisäpinnassa seuraavat si-  
säilman olosuhteiden vaihteluita suhteellisen kosteuden ollessa seinän alaosassa hie-  
man korkeampi kuin seinän yläosassa.

Sisäpuolisen lämmöneristeen ja betoniseinän välisessä rajapinnassa tarkastelupis-  
teessä 3 seinän yläosassa sekä maanpinnan tasalla suhteellinen kosteus on enimmil-  
lään 95 % RH. Syksyllä ja talvikaudella rakenteen lämpötilan vaihdellessa välillä 6...15  
°C suhteellinen kosteus nousee yli 80 % RH, jolloin syntyy myös homeen kasvulle otol-  
liset olosuhteet. Kesäkaudella lämpötila nousee välille 17...21 °C ja suhteellinen kosteus

laskee alle 80 % RH. Tällöin mahdollinen homeen kasvu pysähtyy ja alkaa homeen taantumisen. Tarkastelupisteen 3 lämpötila ja suhteellinen kosteus ajan suhteen on esitetty kuvassa 7.



**Kuva 7.** Lämpötila ja suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä 3

Kyseisellä tarkasteluajanjaksolla rakenteessa ei ole havaittavissa merkittävää homehtumisriskiä missään tarkastelupisteessä. Vaikka rakenteeseen muodostuu homeen kasvun mahdollistavat olosuhteet, materiaalit ovat hometta kohtalaisesti kestäviä, jolloin homeen kasvu on hitaampaa ja homeen määrä vähäisempää. Homeindeksit tarkastelupisteissä on esitetty taulukossa 5.

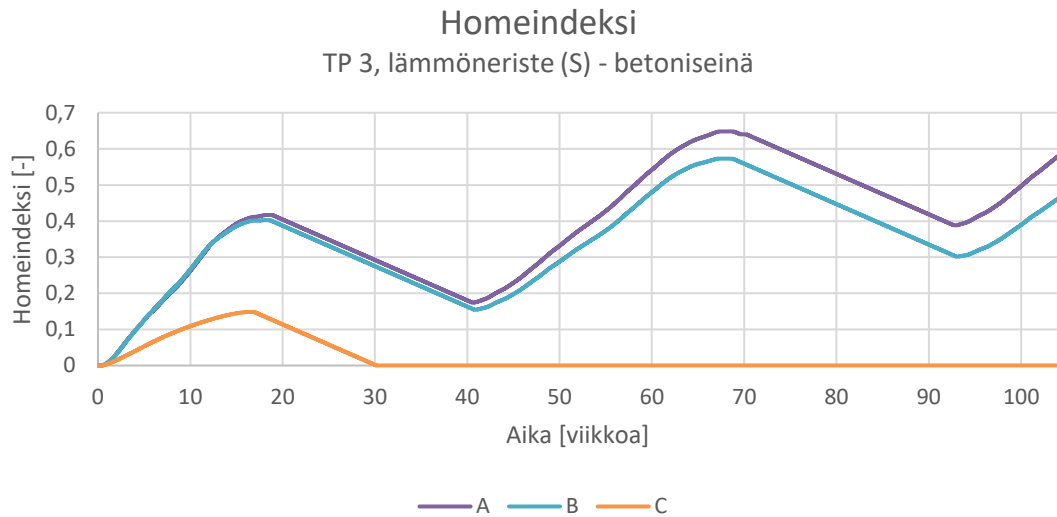
**Taulukko 5.** Homeindeksit tarkastelupisteissä rakennekerroksittain eri korkeusasemissa

Tarkastelupiste	Homehtumis-herkkyyssluokka	A	B	C
TP 1, verhomuurauksen sisäpinta	3	0,00	0,00	0,03
TP 2, verhomuuraus-lämmöneriste (S)	3	0,00	0,00	0,03
TP 3, lämmöneriste (S)-betoniseinä	3	0,65	0,57	0,15
TP 4, betoniseinä-bitumikermi	3	0,00	0,00	0,00
TP 5, bitumikermi-lämmöneriste (U)	3	0,08	0,04	0,26
TP 6, lämmöneristeen (U) ulkopinta	3	0,04	0,03	0,43

Sisäpuolisen lämmöneristeen ja betoniseinän välisessä rajapinnassa homehtumisriski on hieman kohonnut. Homeindeksi on suurimmillaan 0,65 seinän yläosassa ja 0,57 maanpinnan tasolla. Tulosta voidaan kyseisellä tarkasteluajanjaksolla pitää hyväksyttävänä rakenteen toimivuuden kannalta, sillä homeindeksi sijoittuu hyväksyttävälle vaihte-



luvälle 0...1. Lisäksi ulkopuolisen lämmöneristekerroksen ulkopinnassa tarkastelupisteessä TP 6C homeindeksi on hieman kohonnut, mutta edelleen hyväksyttävissä. Homeindeksin kehitys ajan suhteen tarkastelupisteessä 3 on esitetty kuvassa 8.



**Kuva 8.** Homeindeksi betoniseinän ja sisemmän mineraalivillaeristeen rajapinnassa

Kuvasta 8 on huomattavissa, että homeen taantuma tapahtuu homeen kasvua hitaammin. Taantuvan homeen määrä on pienempi kuin homeen kasvukaudella pinnalle kasvavan homeen määrä. Homeindeksi kyseisellä kahden vuoden mittaisella tarkasteluajanjaksolla jää alle hyväksytyin enimmäisarvon, mutta luotettavaa arviota ratkaisun toimivuudesta ei voida näillä tiedoilla kuitenkaan muodostaa. Homeindeksin trendi on nouseva, jolloin luotettavampien arvioiden kannalta rakenteen toimintaa tulisi tarkastella pidemmällä tarkasteluajanjaksolla.

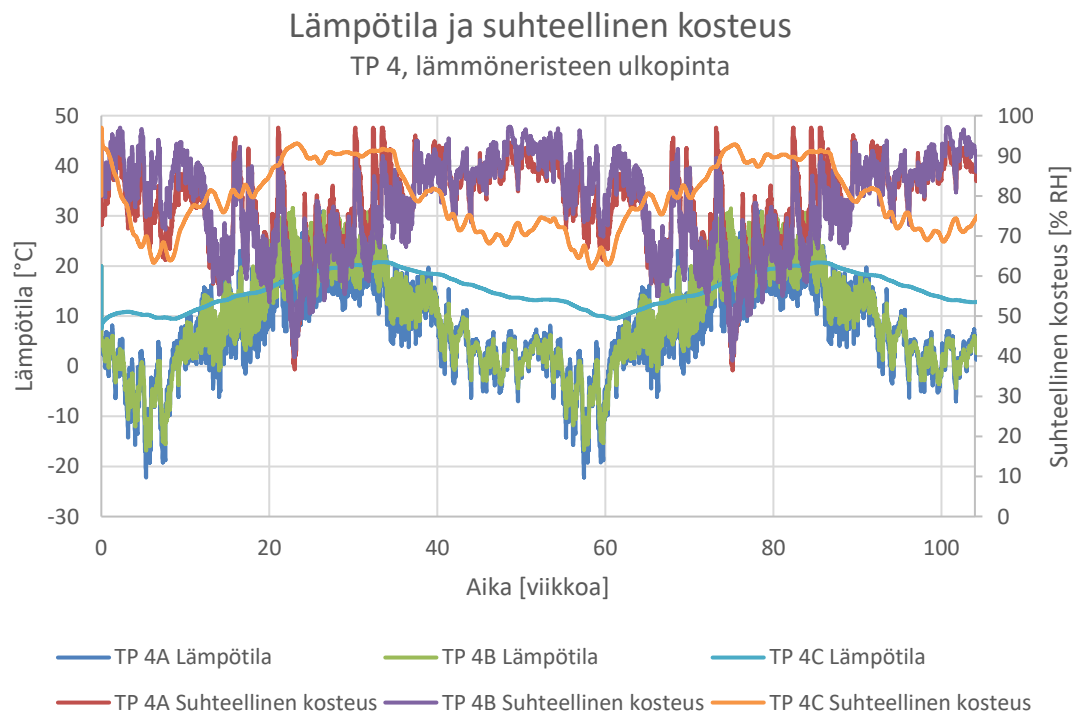
### 5.3 Ulkopuolelta lisälämmöneristetty rakenne

Rakenteen toimintaa tarkasteltiin kustakin korkeusasemasta neljästä eri tarkastelupisteestä:

- TP 1, betoniseinän sisäpinta
- TP 2, betoniseinän ja vedeneristeen välinen rajapinta
- TP 3, vedeneristeen ja ulkopuolisen lämmöneristeen välinen rajapinta
- TP 4, ulkopuolisen lämmöneristeen ulkopinta

Ulkopuolelta lisäeristetyssä rakenteessa betoniseinän lämpötila pysyttelee sisäilman lämpötilan tasolla. Seinän yläosassa lämpötila vaihtelee välillä 18...21 °C ja alaosassa

välillä 15...20 °C. Suhteellinen kosteus seuraa seinän sisäpinnassa sisäilman suhteellista kosteutta vaihdellen pääsääntöisesti välillä 40...75 % RH. Betoniseinän ulkopinnassa suhteellisen kosteuden vaihtelut ovat hitaita vedeneristeen rajoittaessa kosteuden liikkeitä ulospäin. Ulkopuolisen lämmöneristeen sisäpinnassa seinän yläosassa suhteellinen kosteus vaihtelee kesäkaudella välillä 45...95 % RH ja talvikaudella välillä 10...60 % RH lämpötilan pysyessä välillä 18...21 °C. Seinän alaosassa lämpötila vaihtelee välillä 15...21 °C suhteellisen kosteuden vaihdeltaessa välillä 40...95 % RH ollen kesäkaudella korkeampi kuin talvikaudella. Lämmöneristeen ulkopinnalla suhteellisen kosteuden vaihteluväli vastaa sisäpinnan suhteellista kosteutta, mutta lämpötilan vaihtelut ovat suurempia etenkin seinän yläosassa. Seinän yläosassa lämpötila lämmöneristeen ulkopinnalla seuraa ulkoilman lämpötilaa ja seinän alaosassa vaihtelee välillä 10...20 °C.



**Kuva 9.** Lämpötila ja suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä 4

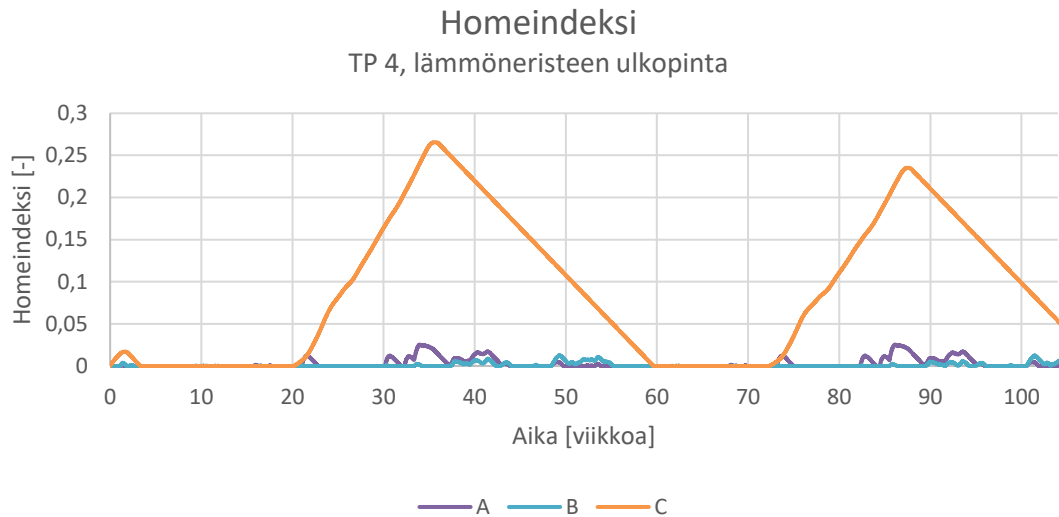
Ulkopuolelta lisälämmöneristetyssä homeen kasvun mahdollistavat olosuhteet muodostuvat kesäkaudella lämmöneristeen molemmille pinnoille. Lämmöneristeen homeenkesto on kuitenkin kohtalaisen hyvä, jolloin homeen määrä materiaalin pinnoilla jää alhaiseksi homeen kasvun mahdollistavan ajanjakson ollessa lyhyt verrattuna homeen kasvunopeuteen. Homeindeksit tarkastelupisteissä on esitetty taulukossa 6.

**Taulukko 6.** Homeindeksit tarkastelupisteissä rakennekerroksittain eri korkeusasemissa

Tarkastelupiste	Homehtumis-herkkyyssluokka	A	B	C
TP 1, betoniseinän sisäpinta	3	0,00	0,00	0,01
TP 2, betoniseinä-bitumikermi	3	0,00	0,00	0,00

TP 3, bitumikermi-lämmöneriste	3	0,04	0,02	0,11
TP 4, lämmöneristeen ulkopinta	3	0,03	0,01	0,27

Homeindeksitarkastelun perusteella ratkaisua voidaan pitää rakennusfysikaalisesti toimivana. Homeindeksi on alhainen kaikissa tarkastelupisteissä. Ulkopuolisen lämmöneristeen ulkopinnassa kellarin lattiatasossa homeindeksi on hieman muuta rakennetta korkeampi, kuitenkin hyväksyttävällä vaihteluvälillä. Homeindeksin kehitys ajan suhteen on esitetty kuvassa 10.



**Kuva 10.** Homeindeksi ulkopuolisen lämmöneristekerroksen ulkopinnassa

Kuvaajasta on nähtävissä homeen kasvukauden sijoittuvan kesäkaudelle. Kasvukauden pituus on kuitenkin varsin lyhyt ja taantumisen mahdollistava ajanjakso pitkä, jolloin kyseisellä tarkasteluajanjaksolla materiaalin pinnalle ei muodostu pysyvää homekasvustoa.

## 6. YHTEENVETO

Alkuperäisessä rakenteessa havaittiin laskennan tulosten perusteella merkittävän suuri homehtumisriski. Alkuperäisessä rakenteessa ei kuitenkaan otettu huomioon mahdollista vedeneristettä, sillä sen toimivuudesta ei voitu varmistua. Näin ollen rakenne ei välttämättä vastaa todellista tilannetta. Tuloksista on kuitenkin huomattavissa rakenteen kosteusteknisen toiminnan riippuvuus vedeneristyksestä. Kyseisen riippuvuuden vuoksi kellarin sisäpuolista lämmöneristystä ei yleisesti pidetä rakennusfysikaalisesti suositeltuna ratkaisuna. Lisäksi epäjatkuvuuskohdat ulkopuolisessa vedeneristyskerroksessa sekä mahdollisesti maaperästä kapillaarisesti nouseva kosteus saattaa aiheuttaa kohonneen kosteuspitoisuuden betonin ja sisäpuolisen lämmöneristeen rajapinnassa ja luoda homeen kasvulle otolliset olosuhteet.

Laskennan tulosten perusteella molemmiin puolin lisälämmöneristetyin rakenteen sisäpuolisessa lisälämmöneristyksessä ei havaittu haitalliseksi kohonnutta homehtumisriskiä kyseisellä tarkasteluajanjaksolla. Ratkaisun toimivuutta tulisi kuitenkin tutkia pidemmällä tarkasteluajanjaksolla luotettavampien arvioiden muodostamiseksi. Ulkopuolelta lisälämmöneristetty ratkaisu on laskennan tulosten perusteella tarkasteltavista rakenteista toimivin ja siinä ei havaittu merkittävää homehtumisriskiä kyseisellä tarkasteluajanjaksolla.

Tulosten luotettavuuden arvioinnissa tulee kuitenkin huomata, että mineraalivillaeristeen asianmukainen toiminta kohteessa on riippuvainen toimivasta suojauksesta ulkopuolista kosteutta ja epäpuhtauksia vastaan. Vedeneristyksen mahdolliset epäjatkuvuus- ja vuotokohdat saattavat aiheuttaa merkittäviä kosteusvaurioita rakenteessa mineraalivillan huokosrakenteen vuoksi. Mineraalivilla kykenee sitomaan vain hyvin vähän kosteutta itseensä, jolloin eristekerrokseen päässyt kosteus leviää helposti laajallekin alueelle.

Laskentatulosten luotettavuutta voidaan parantaa muuttamalla laskennan alussa tehtyjä rajoituksia ja oletuksia. Tutkimuksessa tarkasteluajanjakso rajoitettiin kahteen vuoteen laskentaan kuluvan ajan kohtuullistamiseksi. Samasta syystä myös maaperän vaikutus-alaa ja liittyvien rakenteiden, kuten alapohjan vaikutusta jouduttiin rajaamaan. Laskennassa ei myöskään huomioitu konvektiota, sillä kaikkien rakenteiden osalta vaadittavia materiaaliominaisuuksia ei ollut saatavilla. Kaikki edellä mainitut vaikuttavat osaltaan laskentatulosten tarkkuuteen. Merkittävin vaikutus tulosten luotettavuuteen kuitenkin on tarkasteluajanjakson pituudella ja tarkasteluolosuhteiden valinnalla. Tarkasteluajanjakson

pidettäminen etenkin maanvastaisten ja massiivirakenteiden kosteusteknisessä tarkastelussa on usein perusteltua rakenteen kosteusolosuhteiden tasoittumisen kannalta.

Tarkasteluolosuhteiden valinnassa käytettiin yleiskriittisenä pidettyä Vantaan 2007 testi-ilmastoa. Valittu testi-ilmastoa ei välttämättä ole todellisuudessa rakenteen toiminnan kannalta kriittisin. Lisäksi vuoden 2007 testi-ilmastoa ei kaikilta osin vastaa enää nykyhetken ilmastoa. Ilmasto-olosuhteiden on havaittu muuttuneen arvioitua nopeammin, jolloin rakenteiden toimintaa nykyhetken ilmastossa kuvaa paremmin tarkastelu vuoden 2050 testi-ilmastossa.

# LÄHTEET

- Björkholtz, D. (1997). Lämpö ja kosteus: rakennusfysiikka. Rakennustieto Oy, Helsinki. 150 s.
- Karjalainen, J., Riippa, T. (2010). Jälleenrakennuskauden pientalon korjausopas. Itä-Suomen yliopisto, Kuopio. 57 s.
- Lähdesmäki, K., Salminen, K., Vinha, J., Strander, T., Viitanen, H., Paajanen, L., Iitti, H., Ojanen, T. & Peuhkuri, R. (2009). Homeen kasvu seinärakenteissa laboratorio- ja kenttäkokeissa. Julkaisussa J. Vinha & K. Lähdesmäki (toim.), Rakennusfysiikka 2009. Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut, 27.-29.10.2009, Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laitos, Tampere. S. 229–238.
- Paroc Group Oy. Kellarin eristys ja lisäeristys. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.3.2021): <https://www.paroc.fi/kayttokohteet/rakennusten-eristaminen/perustuksen-eristys-ja-lisaeristys/kellarin-eristys-ja-lisaeristys>
- Pitkäranta M. (toim.) (2016). Ympäristöopas 2016: Rakennusten kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Ympäristöministeriö, Helsinki. 234 s. Saatavissa (viitattu 3.3.2021): [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/75517/YO\\_2016\\_Kuntotutkimusopas.pdf](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/75517/YO_2016_Kuntotutkimusopas.pdf)
- RIL 107-2012 (2012). Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki. 219 s.
- RIL 117 (1979). Lämmön- ja kosteudeneristys. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki. 378 s.
- RIL 249-2015 (2015). Energiatehokas asuinrakennus: kohti lähes nollaenergiarakentamista. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki. 250 s.
- RIL 250-2020 (2020). Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki. 332 s.
- RIL 255-1-2014 (2014). Rakennusfysiikka 1: rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki. 500 s.
- Siikanen, U. (2014). Rakennusfysiikka: perusteet ja sovelluksia. Rakennustieto Oy, Helsinki. 256 s.

Vinha, J., Viitanen, H., Peuhkuri, R., Lähdesmäki, K., Ojanen, T. & Salminen, K. (2013). VTT-TTY homemallin toimintaperiaatteet ja käyttö rakenteiden kosteusteknisen toiminnan tarkasteluissa. Julkaisussa: J. Vinha & A. Aaltonen (toim.), Rakennusfysiikka 2013 : uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut, 22.-24.10.2013, Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laitos, Tampere. S. 67–76.

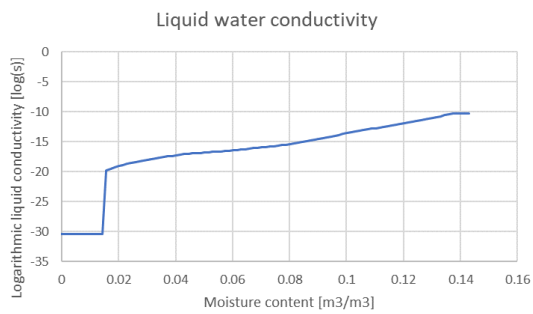
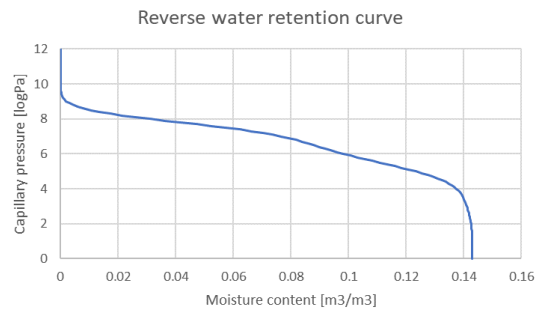
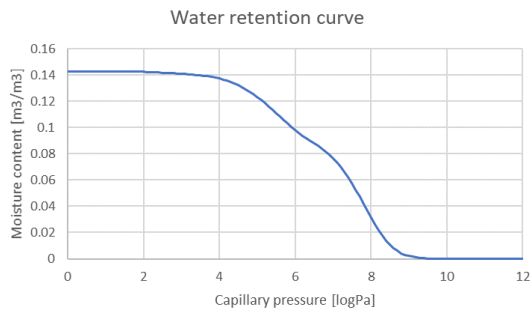
Weijo, I., Lahdensivu, J., Turunen, T., Ahola, S., Sistonen, E., Vornanen-Winqvist, C. & Annala, P. (2019). Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus. Ympäristöministeriö, Helsinki. 284 s.

YMa 4/2013. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatehokkuuden parantamisesta korjaus- ja muutostöissä. Saatavissa (viitattu 19.2.2021): <https://ym.fi/rakentamismaaraykset>

# LIITE A: LASKENNASSA KÄYTETYT MATERIAALIOMINAISUUDET

Betoni (Concrete B25)

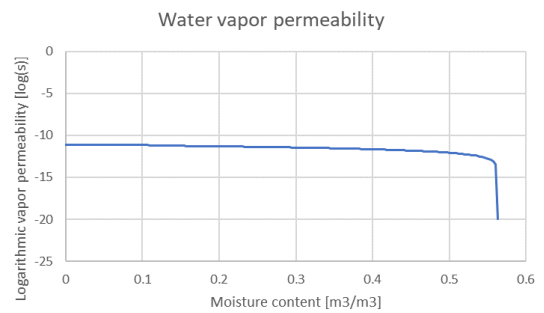
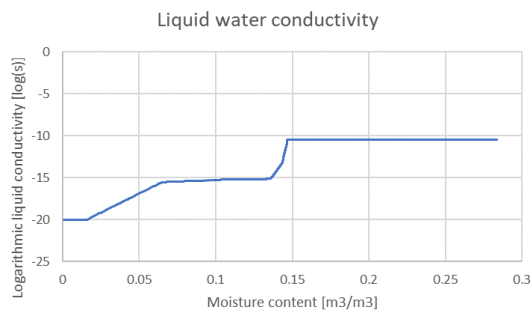
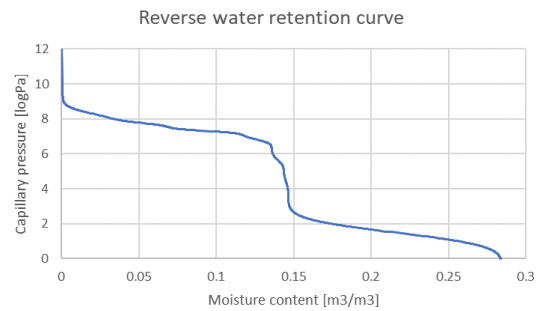
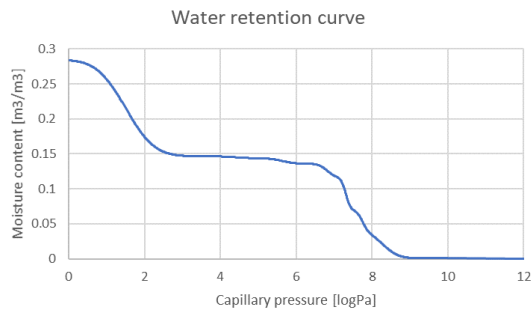
$\rho$	=	2320.2	kg/m <sup>3</sup>
$\lambda$	=	2.1	W/mK
$c_p$	=	850	J/kgK
$\mu$	=	110	-
$\theta_{80}$	=	0.058206	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$\theta_{eff}$	=	0.14299	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$\theta_{por}$	=	0.143	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$A_w$	=	0.008333	kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup>
$K_{leff}$	=	4.4E-11	s





### Kuitusementtilevy (AQUAPANEL Cement Board Outdoor)

$\rho$	=	1158.74	kg/m <sup>3</sup>
$\lambda$	=	0.31255	W/mK
$c_p$	=	1187.97	J/kgK
$\mu$	=	26.4023	-
$\theta_{80}$	=	0.070944	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$\theta_{eff}$	=	0.28364	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$\theta_{por}$	=	0.562738	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$A_w$	=	0.014448	kg/m <sup>2</sup> s05
$K_{leff}$	=	2.53E-12	s

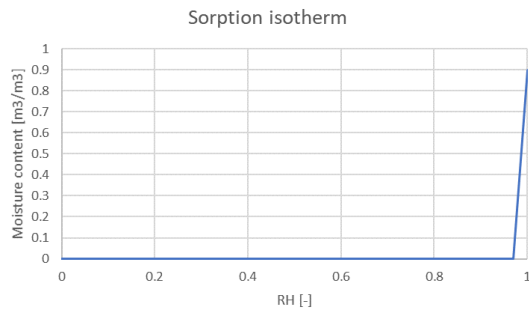


### Tuuletusväli (Air gap 25mm (vertical))

$\rho$	=	1.3	kg/m <sup>3</sup>
$\lambda$	=	0.138	W/mK
$c_p$	=	1050	J/kgK
$\mu$	=	0.4	-
$\theta_{80}$	=	0.00001	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$\theta_{eff}$	=	1	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$\theta_{por}$	=	1	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$A_w$	=	1E-07	kg/m <sup>2</sup> s05
$K_{leff}$	=	0	s

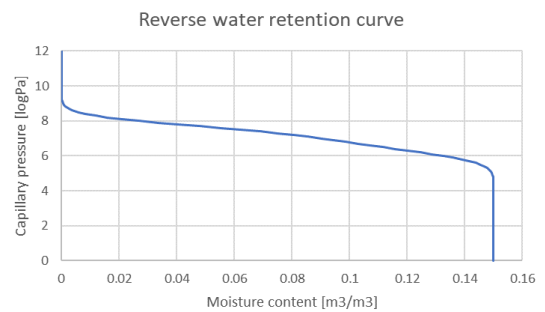
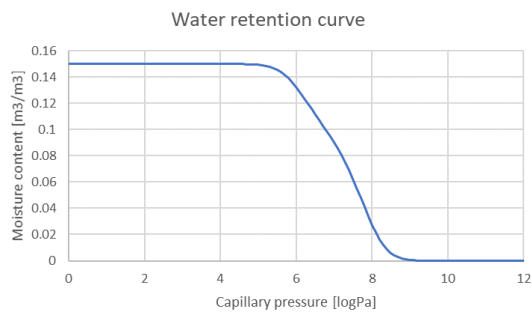
### Kivivilla (Mineral Wool)

$\rho$	=	112 kg/m <sup>3</sup>
$\lambda$	=	0.04 W/mK
$c_p$	=	840 J/kgK
$\mu$	=	1 -
$\theta_{80}$	=	0.000161 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$\theta_{eff}$	=	0.9 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$\theta_{por}$	=	0.92 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$A_w$	=	0 kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup>
$K_{leff}$	=	0 s



### Sora (Gravel)

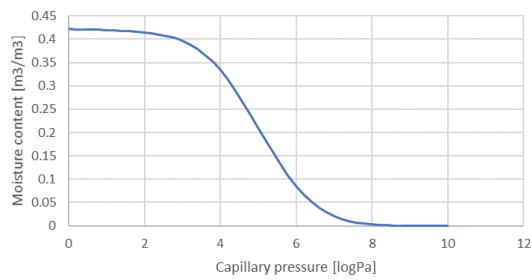
$\rho$	=	2650 kg/m <sup>3</sup>
$\lambda$	=	2.1 W/mK
$c_p$	=	1050 J/kgK
$\mu$	=	7 -
$\theta_{80}$	=	0.063733 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$\theta_{eff}$	=	0.15 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$\theta_{por}$	=	0.24 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$A_w$	=	3E-11 kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup>
$K_{leff}$	=	7.01E-09 s



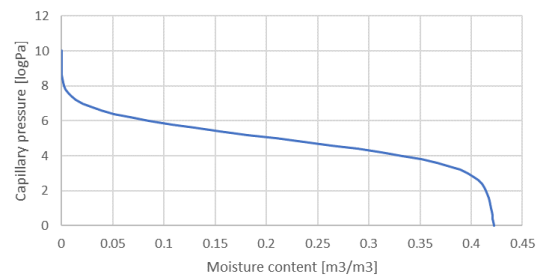
Perusmaa (Clay Loam)

$\rho$	=	1820.07	kg/m <sup>3</sup>
$\lambda$	=	0.497237	W/mK
$c_p$	=	1323.13	J/kgK
$\mu$	=	24.0576	-
$\theta_{80}$	=	No;0.4223	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$\theta_{eff}$	=	0.4223	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$\theta_{por}$	=	0.172313	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$A_w$	=	No	kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup>
$K_{leff}$	=		s

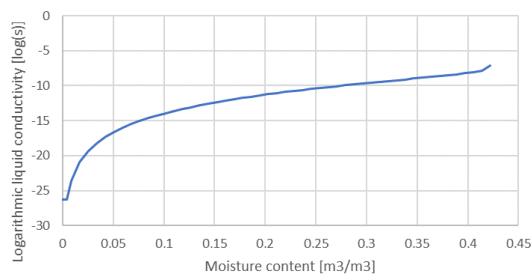
Water retention curve



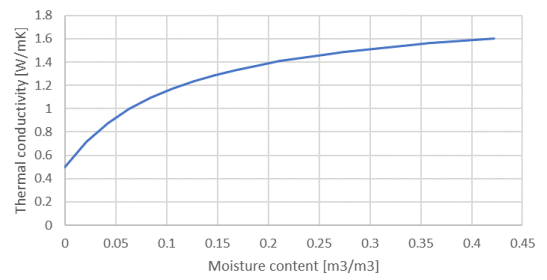
Reverse water retention curve



Liquid water conductivity

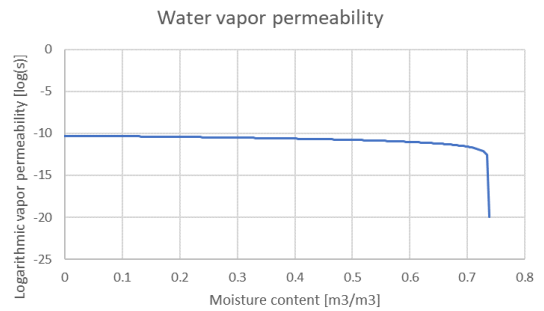
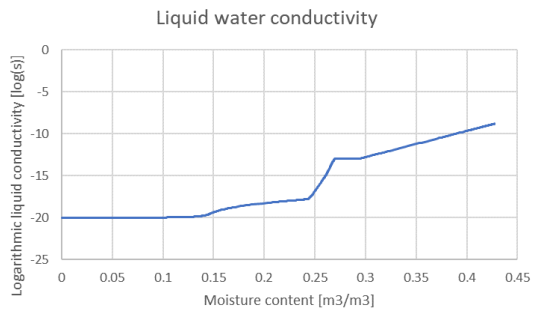
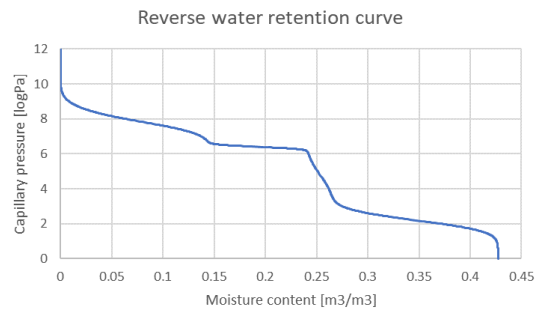
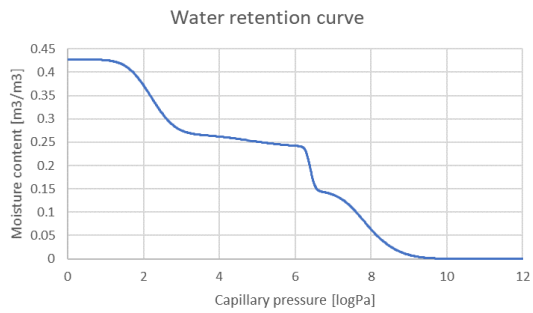


Thermal conductivity



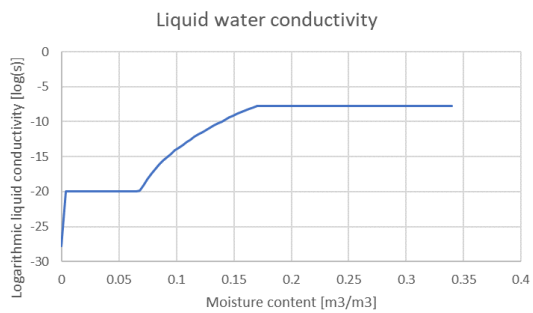
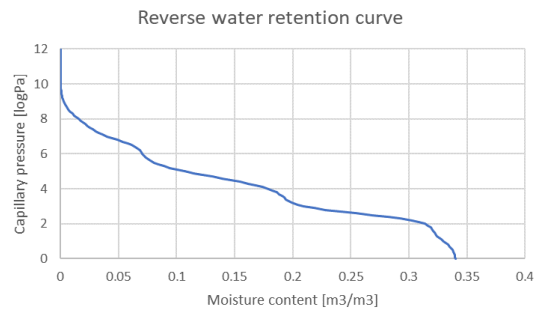
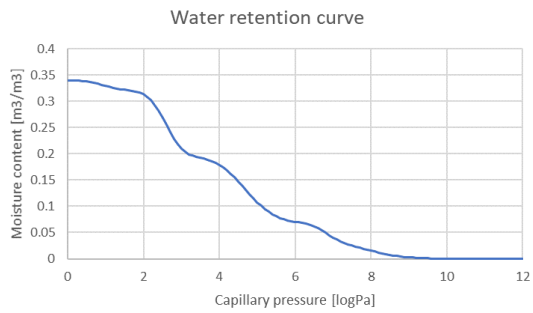
### Kevytsoraharkko (Pumice Concrete)

$\rho$	=	668 kg/m <sup>3</sup>
$\lambda$	=	0.14 W/mK
$c_p$	=	850 J/kgK
$\mu$	=	4 -
$\theta_{80}$	=	0.110731 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$\theta_{eff}$	=	0.42715 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$\theta_{por}$	=	0.738 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$A_w$	=	0.035 kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup>
$K_{leff}$	=	1.5E-09 s



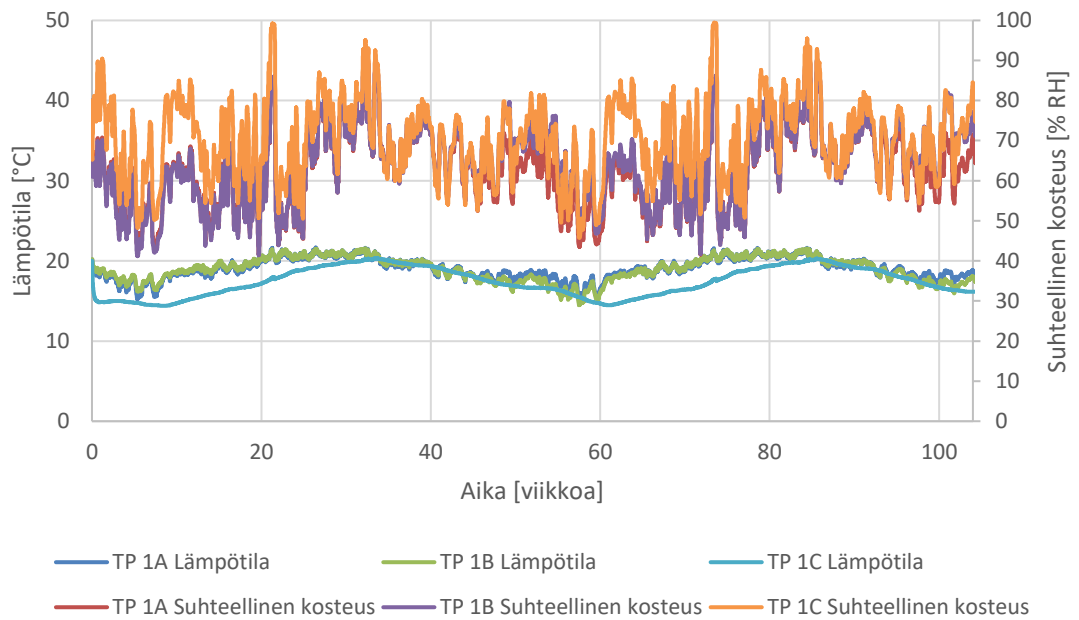
### Lastuvilla (Wood Wool Cement Board)

$\rho$	=	180	kg/m <sup>3</sup>
$\lambda$	=	0.06	W/mK
$c_p$	=	1470	J/kgK
$\mu$	=	4.9	-
$\theta_{80}$	=	0.025839	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$\theta_{eff}$	=	0.34	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$\theta_{por}$	=	0.9308	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$A_w$	=	0.0089	kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup>
$K_{leff}$	=	1.68E-08	s

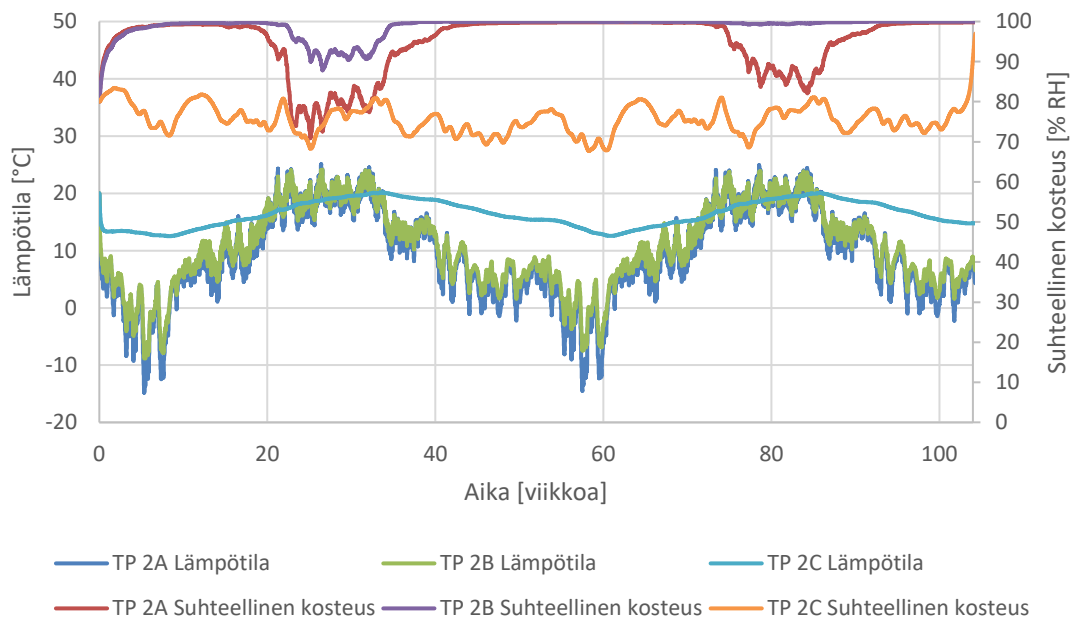


# LIITE B: LÄMPÖTILA JA SUHTEELLINEN KOSTEUS TARKASTELUPISTEISSÄ

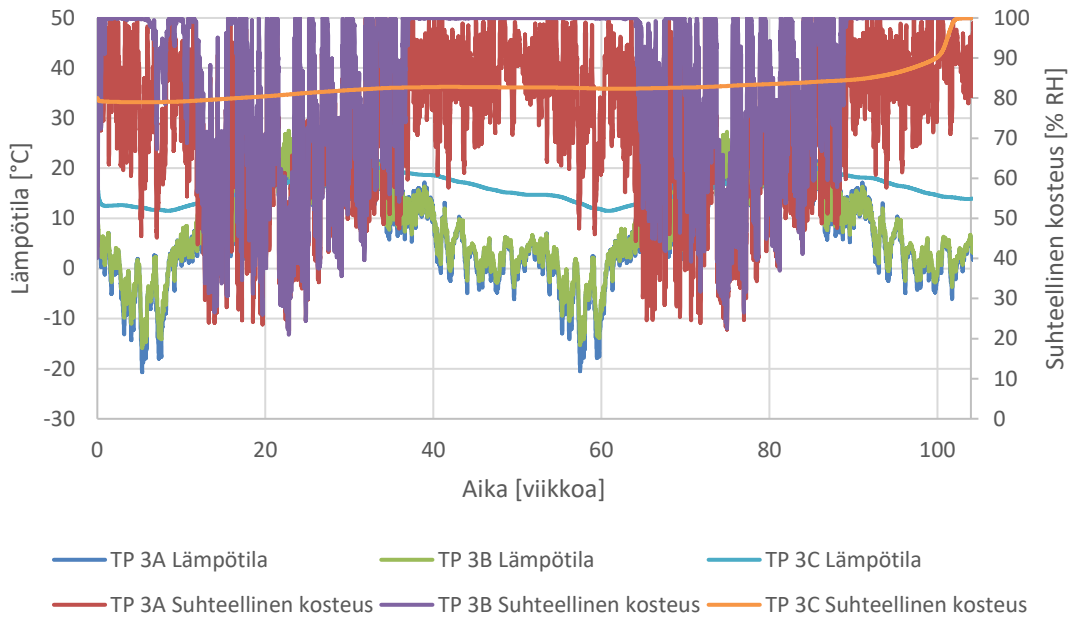
Alkuperäinen rakenne  
TP 1, lämmöneristeen sisäpinta



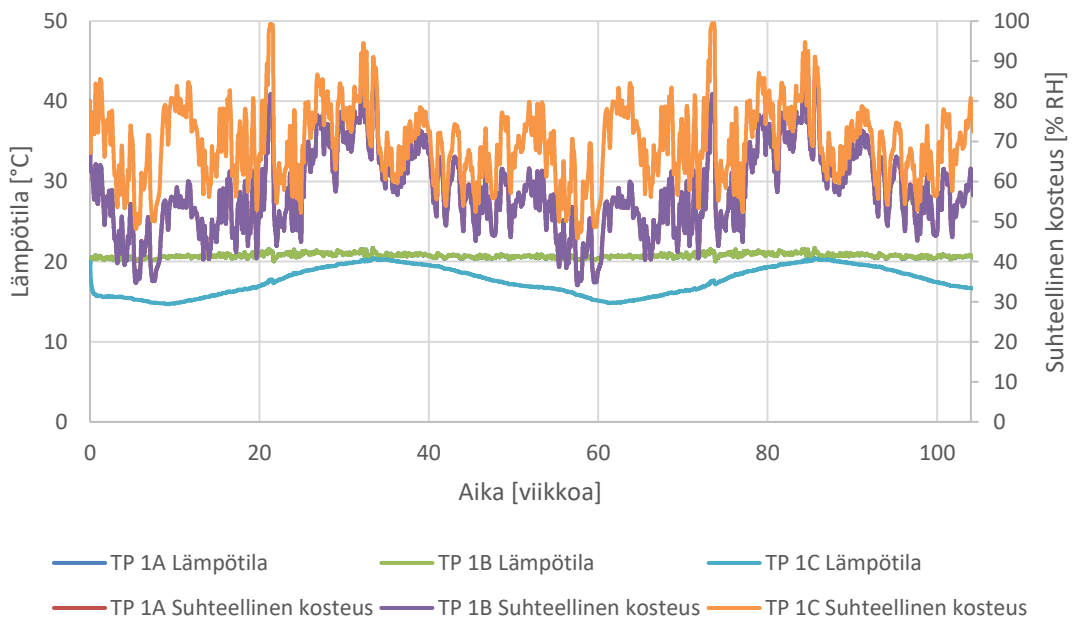
Alkuperäinen rakenne  
TP 2, lämmöneriste - betoniseinä



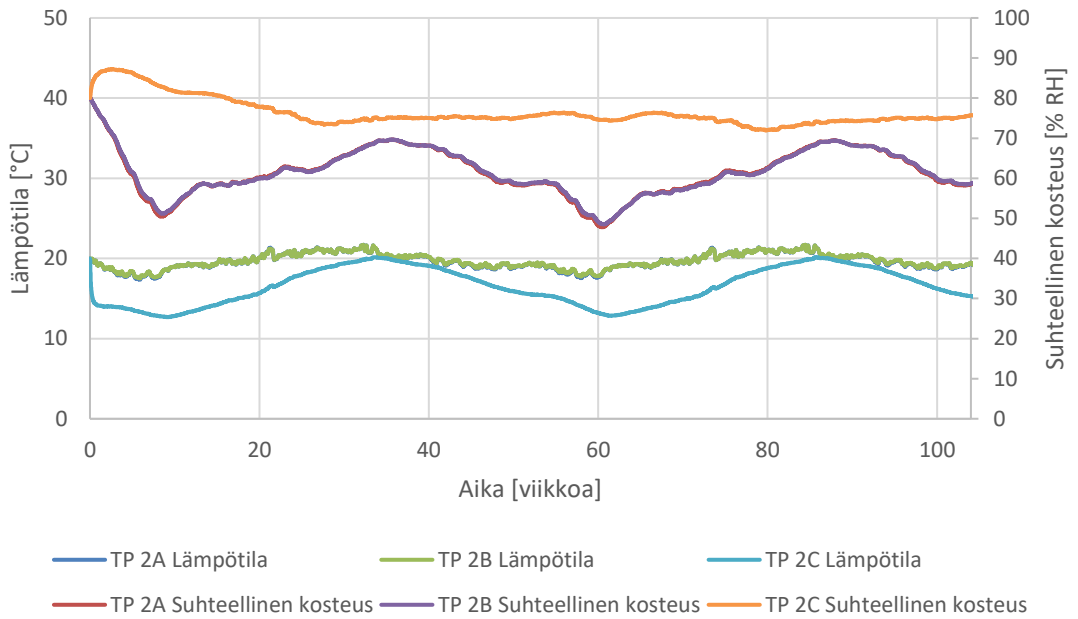
### Alkuperäinen rakenne TP 3, betoniseinän ulkopinta



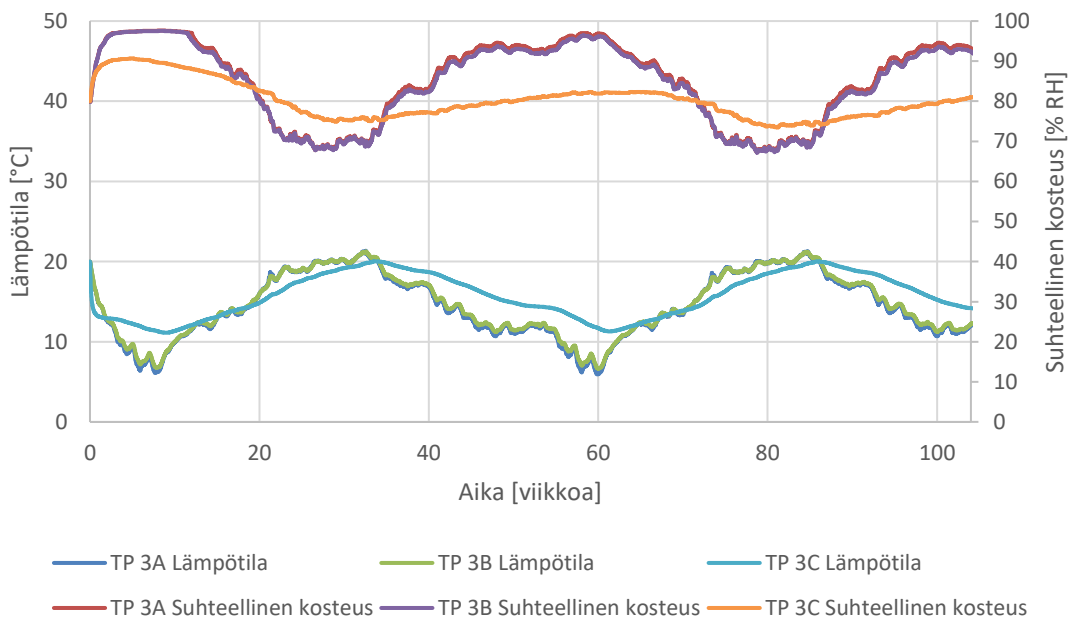
### Molemmin puolin lisälämmöneristetty rakenne TP 1, verhomuurauksen sisäpinta



### Molemmin puolin lisälämmöneristetty rakenne TP 2, verhomuoraus - lämmöneriste (S)



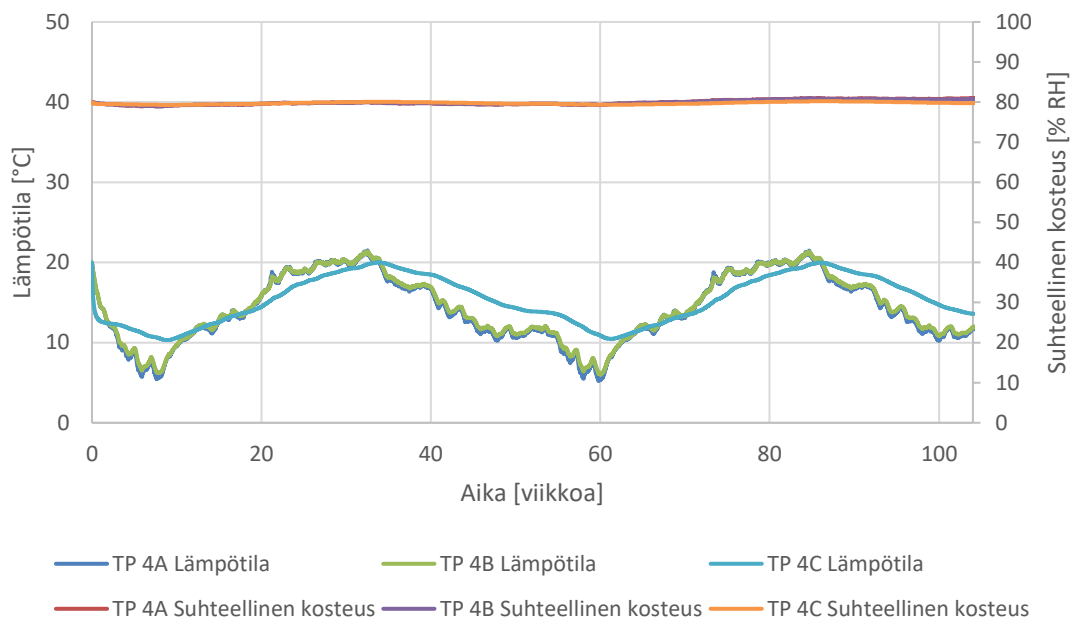
### Molemmin puolin lisälämmöneristetty rakenne TP 3, lämmöneriste (S) - betoniseinä





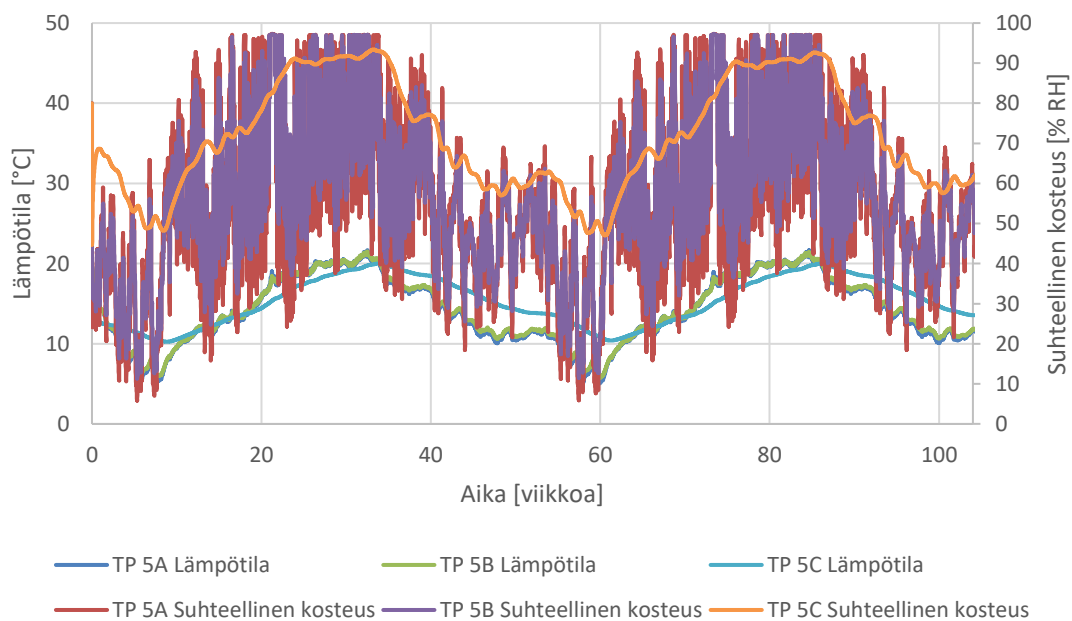
## Molemmin puolin lisälämmöneristetty rakenne

TP 4, betoniseinä - bitumikermi

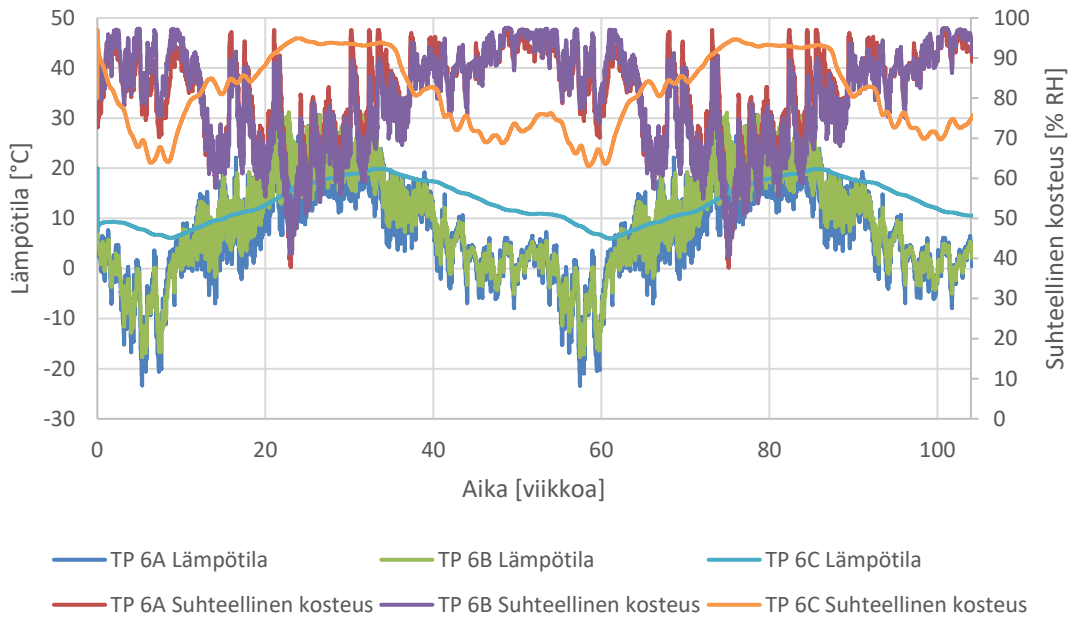


## Molemmin puolin lisälämmöneristetty rakenne

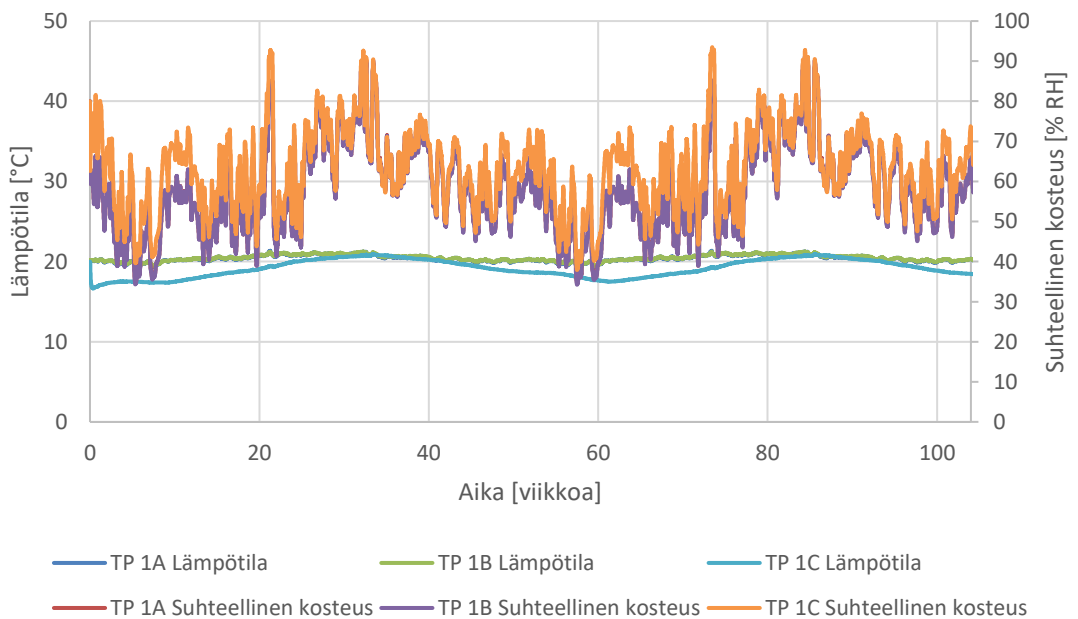
TP 5, bitumikermi - lämmöneriste (U)



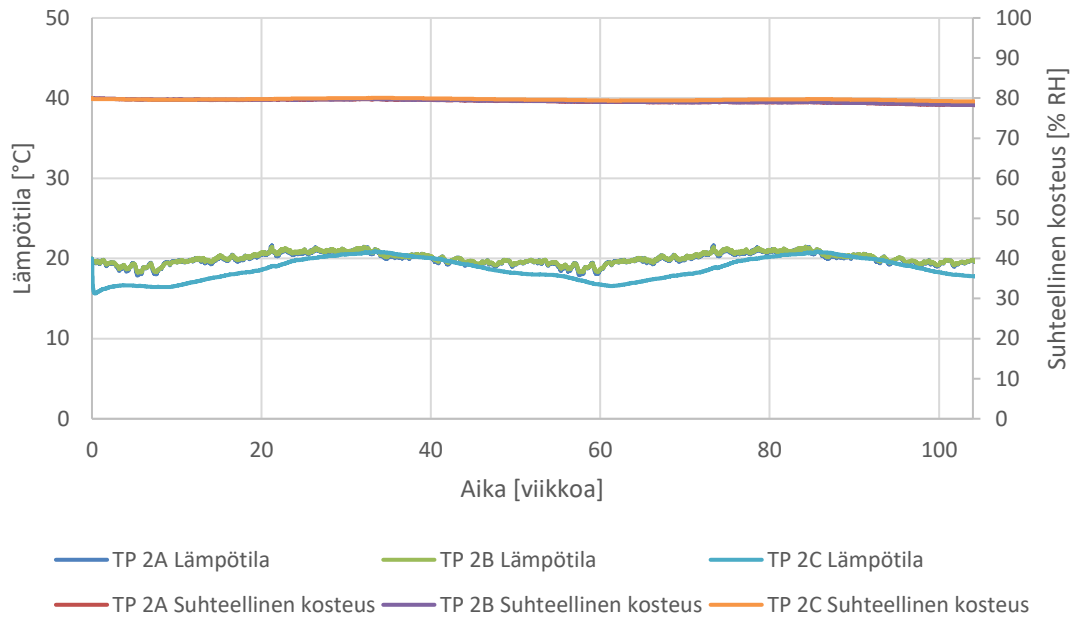
### Molemmin puolin lisälämmöneristetty rakenne TP 6, lämmöneristeen (U) ulkopinta



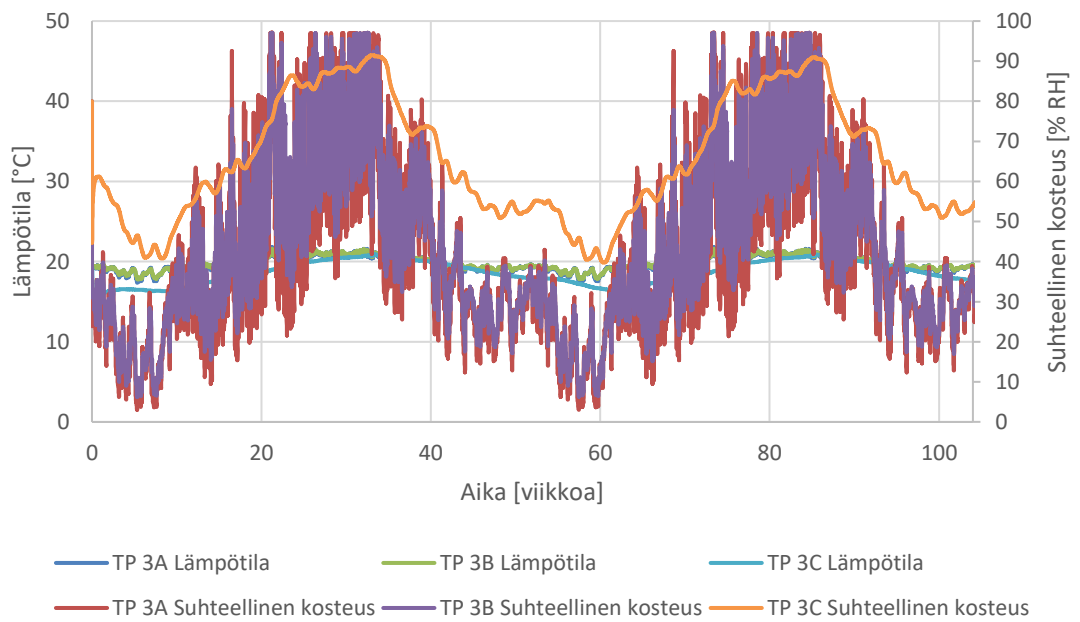
### Ulkopuolelta lisälämmöneristetty rakenne TP 1, betoniseinän sisäpinta



### Ulkopuolelta lisälämmöneristetty rakenne TP 2, betoniseinä - bitumikermi

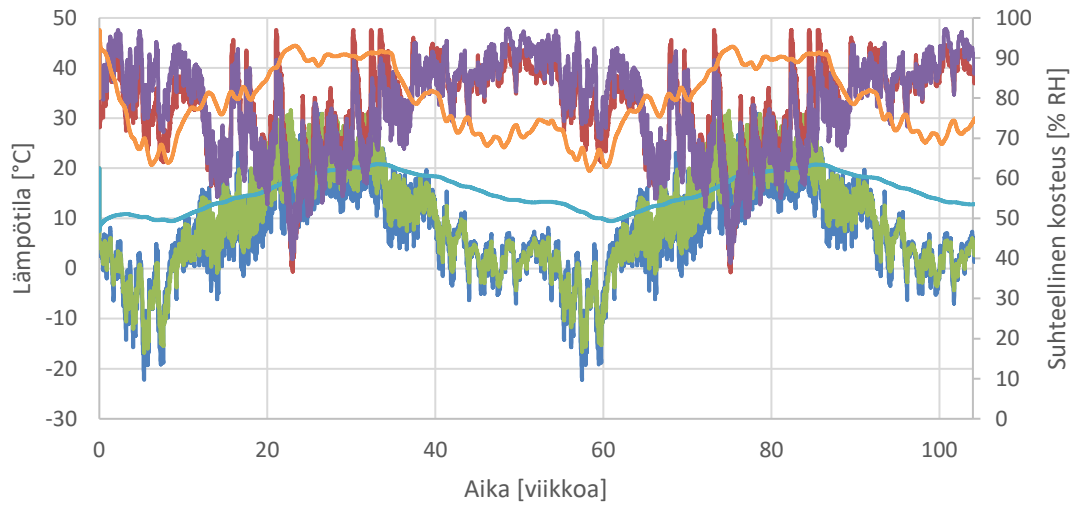


### Ulkopuolelta lisälämmöneristetty rakenne TP 3, bitumikermi - lämmöneriste



# Ulkopuolelta lisälämmöneristetty rakenne

## TP 4, lämmöneristeen ulkopinta



— TP 4A Lämpötila      — TP 4B Lämpötila      — TP 4C Lämpötila  
— TP 4A Suhteellinen kosteus      — TP 4B Suhteellinen kosteus      — TP 4C Suhteellinen kosteus