

KAPSELOINTIKORJAUKSEN
RAKENNUSFYSIKAALINEN TOIMIVUUS
Maanvastaiset rakenteet



Ylemmän ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Visamäki, Insinööri (YAMK) Rakentaminen

Kevät, 2019

Heikki Aronen

Rakentaminen, ylempi AMK
Visamäki

Tekijä	Heikki Aronen	Vuosi 2019
Työn nimi	Kapselointikorjauksen rakennusfysikaalinen toimivuus – Maanvastaaiset rakenteet	
Työn ohjaaja/t	Tapio Korkeamäki	

TIIVISTELMÄ

Tässä opinnäytetyössä käsitellään maanvastaisten rakenteiden kapselointikorjausta, sen syitä, vaihtoehtoja, riskejä sekä rakennusfysikaalista toimivuutta. Opinnäyte tehtiin Sitowise Oy:n Espoon korjausrakenneyksikössä. Työn yhteydessä kehitettiin myös yrityksen rakennusfysikaaliseen suunnitteluun ja mallintamiseen laskentarutiineja sekä raportointityökaluja.

Työssä selvitettiin, soveltuuko kapselointikorjaus maanvastaisten rakenteiden korjaamiseen silloin, kun halutaan kapseloida haitta-aineita purkavan korjauksen sijaan, vai tuleeko korjaustavan käyttämistä rajoittaa esim. tiettyjen rakennetyyppien osalta. Laskennalliset selvitykset tehtiin lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden näkökulmasta käyttämällä hyväksi mm. Suomalaista homemallia, stationääristä ja epästationääristä laskentaa. Tutkimus tehtiin tapaustutkimuksena, jossa käsiteltiin kolmea eri hypoteettista korjauskohdetta, joissa korjattiin haihtuvien haitta-aineiden aiheuttamia ongelmia.

Työn tuloksena voidaan todeta kapselointikorjauksen lisäävän maanvastaisten rakenteiden kosteusrasitusta, mutta ei aina kriittisessä suhteessa. Tällaisia rakenteita korjattaessa ja suunniteltaessa on hyvä ottaa käyttöön rakennusfysikaalinen mallinnus ja varmistua rakenteen toimivuudesta laskennallisesti. Tämän lisäksi suositellaan olemassa olevan rakenteen kunto- tutkimusta, jotta saataisiin kattavat lähtötiedot laskentaa ja korjaussuunnittelua varten. Tämä on tärkeää varsinkin silloin, jos todettua riskirakennetta korjataan kapseloimalla.

Avainsanat rakennusfysiikka, maanvastaaiset rakenteet, korjausrakentaminen, kapselointikorjaus, rakennusfysikaalinen mallinnus, VOC, PAH, Suomalainen homemalli, riskitarkastelut.

Sivut 139 sivua, joista liitteitä 57 sivua

Degree Programme in Construction and Environmental Engineering
Visamäki

Author Heikki Aronen Year 2019

Subject of Master's thesis Building Physical Functionality of Encapsulation Renovation
– Underground Structures

Supervisor Tapio Korkeamäki

ABSTRACT

This thesis handles and considers the reasons, options, risks and building physical functionality of encapsulation renovation of underground structures. Thesis was made in the renovation unit of Sitowise Ltd. In addition to this reporting tools and calculation routines were developed for building physical design and modeling and as a part of the thesis.

Aim was to clarify restrictions of encapsulation renovation in certain type of structures and suitability of encapsulation instead of demolishing a structure. Building physical computational clarifications were made from perspective of heat and accumulating moisture while using several computational tools, such as: Finnish mould growth model, stationary and transient heat and moisture calculation programs. Scrutiny was done as a case study for three targets, in which imaginary structures were having problems with volatile compounds.

Encapsulation renovation will increase moisture content of a structure but not necessarily in critical way. When renovating and designing encapsulation of a structure it is a good practice to take in use building physical modeling tools and ensure the functionality of the structure with calculations. In addition to this it is recommended to survey the structure thoroughly to ensure comprehensive information for design and computational tasks. This is especially essential when renovating risk structure with encapsulation methods.

Keywords Building physics, underground structures, renovation, encapsulation renovation, building physical modeling, VOC, PAH, Finnish mold growth model, risk analysis.

Pages 139 pages including appendices 57 pages

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
1.1	Opinnäytetyön tausta.....	1
1.2	Opinnäytetyön tavoitteet ja rajaus.....	2
1.3	Opinnäytetyössä käytetyt tutkimusmenetelmät.....	2
1.4	Opinnäytetyön rakenne.....	3
2	KAPSELOINTI KORJAUSRAKENTAMISESSA.....	4
2.1	Sisäilman epäpuhtaudet.....	4
2.2	Emissio päästöilmionä.....	5
2.3	Kapseloitavat haitta-aineet ja epäpuhtaudet rakenteissa.....	8
2.3.1	VOC-yhdisteet.....	8
2.3.2	PAH-yhdisteet.....	9
2.3.3	Öljyhiilivedyt.....	11
2.3.4	Muovimatto-ongelma.....	13
2.4	Kapselointikorjauksen syyt, menetelmät ja vaihtoehtoiset korjaustavat.....	17
3	LÄMPÖ- JA KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA.....	21
3.1	Lämpö ja lämmön siirtymismuodot.....	21
3.1.1	Lämmönläpäisykertoimen laskenta.....	23
3.2	Kosteus ilmassa ja veden olomuodot.....	24
3.3	Kosteuden sitoutuminen ja siirtyminen aineessa.....	26
3.3.1	Diffuusio.....	28
3.3.2	Kapillaari-imu.....	28
3.3.3	Kosteuskonvektio.....	30
3.4	Maanvastaiset rakenteet.....	30
3.5	Homeindeksi.....	33
3.6	Rakennusfysikaalinen mallinnus.....	34
3.6.1	WUFI 1D- ja 2D rakennusfysikaalinen mallinnus.....	36
3.6.2	Rakennusfysikaaliset testivuodot.....	38
3.6.3	Sisäilman olosuhteet.....	39
3.6.4	Maanvastaisen rakenteen rakennusfysikaaliset simulointiolosuhteet.....	41
3.7	Rakennustuotteiden rakennusfysikaaliset ominaisuudet.....	48
4	RAKENNUSFYSIKAALINEN RISKIANALYYSI JA RISKIRAKENTEET.....	50
4.1	Riskianalyysimenetelmät ja riskien hallinta yleisesti.....	50
4.1.1	Erytymenettely ja rakennusfysikaalisen toimivuuden riskiarvio.....	52
4.1.2	Kosteusteknisen riskin arviointi.....	53
4.1.3	Kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmä.....	54
4.2	Rakennusten kosteuslähteet ja kosteusvaurioiden muodostuminen.....	55
4.3	Tutkittavat riskirakennetyypit ja kosteusriskit.....	56
4.3.1	Maanvastaiset rakenteet.....	56
4.3.2	Massiiviset seinärakenteet.....	57
4.3.3	Rankarakenteiset seinärakenteet.....	58
4.4	Tapaustutkimuksissa käytettävät riskien hallintamenetelmät.....	58

5	TAPAUSTUTKIMUKSET	59
5.1	Tapaus A	59
5.1.1	Alkuperäisen rakenteen riskianalyysi	60
5.1.2	Korjaustapa ja -laajuus	61
5.1.3	Korjaustavan riskien arviointi rakennusfysikaalisen laskennan avulla ..	61
5.1.4	Korjauksen riskien toteutuvuuden arviointi.....	65
5.2	Kohde B.....	66
5.2.1	Alkuperäisen rakenteen riskianalyysi	67
5.2.2	Korjaustapa ja -laajuus	67
5.2.3	Korjaustavan riskien arviointi rakennusfysikaalisen laskennan avulla ..	67
5.2.4	Riskien toteutuvuuden arviointi	69
5.3	Tapaus C.....	69
5.3.1	Alkuperäisen rakenteen riskianalyysi	70
5.3.2	Korjaustapa ja -laajuus	70
5.3.3	Korjaustavan riskien arviointi rakennusfysikaalisen laskennan avulla ..	70
5.3.4	Riskien toteutuvuuden arviointi	71
6	TAPAUSTUTKIMUSTEN YHTEENVETO	73
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	74
	LÄHTEET.....	76

Liitteet

Liite 1	Tapauksittain A, B ja C rakenneleikkaukset, 3 s.
Liite 2	Simuloinneissa käytettyjen materiaalien laskentaparametrit, 7 s.
Liite 3	Tapaus A, lämmönvastuksien ja pintalämpötilojen vertailulaskelmat, 2 s.
Liite 4	Tapaus B, lämmönvastuksien ja pintalämpötilojen vertailulaskelmat, 2 s.
Liite 5	Tapaus C, lämmönvastuksien ja pintalämpötilojen vertailulaskelmat, 2 s.
Liite 6	Vesimenttisuhteen 0,6 betonin vesihöyryvastuksien laskenta, 2 s.
Liite 7	Kapselointiepoksien vesihöyryvastuksien laskenta, 2 s.
Liite 8	Bitumisivelykäsittelyiden vesihöyryvastuksien laskenta, 2 s.
Liite 9.1	Tapaus A: rakennusfysikaalisten simulointien tarkastelupisteiden lämpötilan ja suhteellisen kosteuden sekä homeindeksin kuvaajat 1–6, 7 s.
Liite 9.2	Tapaus A: rakennusfysikaalisten simulointien tarkastelupisteiden lämpötilan ja suhteellisen kosteuden sekä homeindeksin kuvaajat 7–12, 7 s.
Liite 10.1	Tapaus B: rakennusfysikaalisten simulointien tarkastelupisteiden lämpötilan ja suhteellisen kosteuden sekä homeindeksin kuvaajat 1–6, 7 s.
Liite 10.2	Tapaus B: rakennusfysikaalisten simulointien tarkastelupisteiden lämpötilan ja suhteellisen kosteuden sekä homeindeksin kuvaajat 7–12, 7 s.
Liite 11	Tapaus C: rakennusfysikaalisten simulointien tarkastelupisteiden 1...4 lämpötilan ja suhteellisen kosteuden sekä homeindeksin kuvaajat, 5 s.
Liite 12	Sisäilman suhteellinen kosteus Jokioisilla 2004, laskettuna kuukausikeskiarvoilla, 2 s.

1 JOHDANTO

1.1 Opinnäytetyön tausta

Opinnäytetyö tehtiin talo- ja infrasuunnittelun uudis- ja korjausrakentamisen konsultointi-, tutkimus-, suunnittelu- ja rakennuttamispalveluita tekevälle Sitowise Oy:lle. Yritys on kotimaisessa omistuksessa (Sitowise Oy 2019). Työ tehdään korjausrakentamisen palveluiden toimialalle, Espoon Leppävaaran toimipisteessä.

Opinnäytetyön on tarkoitus palvella korjausrakennesuunnittelijoiden työtä antamalla ohjeistuksia, mallisuunnitelmia ja rakennusfysikaalisia laskentamalleja maanvastaisen rakenteen rakennusfysikaaliseen mallintamiseen ja kapselointikorjauksen suunnittelun suorittamiseen tai kun kohteessa harkitaan kapselointikorjausta.

Kapselointikorjaukset ja rakenteiden tiivistyskorjaukset ovat olleet viime aikoina paljon esillä rakennusalan mediassa ja esimerkiksi Ympäristöministeriön Kosteus- ja Hometalkoiden yhteydessä (Haila & Vuorela 2016, 22). Korjausrakentamisen volyyymi kasvaa vuosittain ja korjausrakentamisen yhtenä osa-alueena ovat sisäilmakorjaukset, joita tehdään yhä enenevässä määrin. Sisäilmakorjausten yksi osa-alue on tiivistys- ja kapselointikorjaukset. Rakenteiden tiivistyskorjauksia tehdään kuitenkin usein puutteellisin lähtötiedoin ja tutkimuksin, niin sanottuna siirtävänä korjauksena, jolloin suuremmat korjaustoimenpiteet siirretään seuraavaan suurempaan peruskorjaukseen (Tompuri & Mölsä, 2016).

Usein olemassa olevat vanhojen rakenteiden haitta-aineet ja mikrobit ovat rakenteiden sisällä, rakennekerrosten välissä, jolloin rakenteen epätiiveyskohdat ovat epätoivottujen aineiden yleisin kulkeutumisreitti sisäilmaan. Vaihtoehtoisesti haitta-aineet voivat olla imeytyneenä myös itse rakenteeseen, esimerkiksi betonilattiaan, jolloin rakenteen korjausvaihtoehdot ovat purku tai haitta-aineen kapselointi (Jokipii 2014, 25–26). Muita mahdollisia korjausvaihtoehtoja ovat rakenteen alipaineistaminen tai edellä mainittujen korjaustapojen yhdistelmät. (Hongisto 2016, 23–31).

Mikrobien ja haitta-aineiden kulkeutumisesta sisäilmaan haihtamalla ei ole juurikaan saatavilla tutkimustietoa, lukuun ottamatta tuotevalmistajien teettämiä omia tutkimuksia juuri heidän tuotteilleen. Esimerkiksi mikrobien tuottamien toksiinien kulkeutumisreiteistä sisäilmaan ei ole saatavilla yksiselitteistä tutkimustietoa (Leivo & Rantala 2006b, 19).

Kapselointikorjaustuotteita myyvät yritykset eivät yleensä ole, ainakaan myyntiesitteissään, ottaneet esille rakenteen muuttunutta rakennusfysikaalista toimintaa.

1.2 Opinnäytetyön tavoitteet ja rajaus

Kapselointiaineiden vaikutuksia rakenteiden rakennusfysikaaliseen toimintaan ole juurikaan käsitelty alan kirjallisuudessa, ja erilaisten kemiallisten aineiden yhteensopivuutta ei ole helposti löytyvässä muodossa saatavilla. Myös kapselointiaineiden pitkäaikaistoimivuudesta on myös ollut esillä epäilyksiä.

Tämän tutkimuksen keskeiset tutkimuskysymykset ovat:

- 1) Millainen riski on tehdä rakenteeseen pelkkä kapselointikorjaus, kun muita toimenpiteitä ei ole varaa tehdä?
 - a) Miten kapselointituotteet vaikuttavat maanvaraisen rakenteen kosteustekniseen käyttäytymiseen?
 - b) Miten mahdollinen rakenteen muuttunut kosteuskäyttäytyminen vaikuttaa ympäröiviin rakenteisiin?
- 2) Sopiiko kapselointikorjaus pitkäikäiseksi korjaustavaksi?
- 3) Onko kapselointikorjaukselle kustannustehokkaita vaihtoehtoja?
- 4) Vaatiiko kapselointikorjaus lisäsuunnittelua tai erikoisratkaisuja rakenteen toimintaedellytyksen varmistamiseksi?

Tarkoitus on kartoittaa varmat ratkaisut eri rakennetyypeille sekä eritellä riskiratkaisut, jotka vaativat erikoissuunnittelutoimenpiteitä.

1.3 Opinnäytetyössä käytetyt tutkimusmenetelmät

Tutkimus oli alun perin tarkoitus tehdä yrityksen toteutuneiden kohteiden perusteella. Alustavassa tarkastelussa kattavaa määrää vertailtavia kohteita ei kuitenkaan löytynyt, joten päädyttiin tekemään vertailu kirjallisuuskatsauksen avulla yleisesti käytössä olleista rakenteista siten, että jokaiselle määriteltiin hypoteettinen tarve kapselointikorjaukselle. Tämän jälkeen tehtiin valitulle rakenteelle alustava riskikartoitus ja rakennusfysikaalinen mallinnus, jolla arvioitiin rakenteen riskien toteutumista.

Rakennusfysikaalista laskentaa on tarkoitus tehdä käsin laskentana, laskentataulukkoilla ja mallinnusohjelmilla. Laskennassa on tarkoitus ottaa huomioon rakenteen kosteudensitovuuskyky ja vaurioherkyys, sekä potentiaalinen kuivuminen. Rakennusfysikaaliset laskelmat tehdään yleisesti hyväksytyjen laskentaperiaatteiden mukaan.

Korjauskohteiden pohjalta tehdään niissä esiintyville rakenteille riskikartoitukset soveltamalla olemassa olevaa kirjallisuutta, tutkimuksia ja rakennusfysikaalista taulukko- sekä käsin laskentaa. Havaittujen riskien osalta rakennekokonaisuudelle tehdään rakennusfysikaalinen mallinnus, jonka tuloksena arvioidaan riskien toteutumista.

Opinnäytteen toimeksiantajayrityksestä Sitowise Oy:stä löytyy useita haitta-aineisiin, rakennusfysiikkaan ja sisäilmakorjauksiin perehtyneitä

asiantuntijoita, joiden kanssa käytyjä keskusteluita aihepiiristä ei erikseen dokumentoida opinnäytetyön lähteiksi.

1.4 Opinnäytetyön rakenne

Opinnäytetyössä käsitellään kapselointikorjauksiin liittyviä haasteita rakenteiden rakennusfysikaalisen toimivuuden näkökulmasta. Aihealue, syyt ja menetelmät esitellään johdannon jälkeen luvussa kaksi. Rakennusfysikaalinen teoriapohja, jota soveltamalla laskelmat ja mallinnukset rakenteiden toimivuudesta tehdään, käydään läpi kolmannessa luvussa. Toisessa ja kolmannessa pääluvussa opinnäytetyön aihetta tarkastellaan kirjallisuuskatsauksen avulla.

Neljännessä luvussa läpikäydään eri menetelmät tapaustutkimusten analysointiin. Luvussa tarkastellaan mm. eri menetelmiä tapaustutkimusten riskien arviointiin. Luvun lopputuotteena saadaan riskiarviomenetelmä sekä rakennusfysikaalinen laskentamalli opinnäytteen tapaustutkimuksille. Tässä käytetään hyväksi konstruktivistista tutkimusotetta, eli tapaustutkimusten edetessä laskentamenetelmää ja hypoteettista suunnitteluratkaisua tarkennetaan ja kehitetään tarpeen mukaan.

Tapaustutkimukset tehdään luvussa viisi. Tapaustutkimuksissa tarkastellaan lähtötilannetta, syitä korjaukseen ja korjattua tilannetta edellisissä luvuissa kehitetyin menetelmin. Kuudennen luvun tapaustutkimusten yhteenvedossa analysoidaan, millaisissa rakennetyypeissä kapselointikorjaukset laskelmien perusteella toimivat

Viimeisessä pääluvussa arvioidaan tutkimustuloksia ja niiden luotettavuutta sekä esitellään tutkimustulokset, kehitysajatukset ja jatkotutkimustarpeet.

Kuvien, kaavioiden ja taulukoiden osia korostetaan tai rajataan punaisella katkoviivalla. Menetelmää käytetään työn kaikissa osissa.

2 KAPSELOINTI KORJAUSRAKENTAMISESSA

Kapselointikorjaus terminä alkaa olla jo vakiintuneessa käytössä korjausrakentamisen ammattilaisten keskuudessa. Usein sillä tarkoitetaan suuren diffuusiovastuksen omaavan materiaalin asentamista rakenteeseen, jolloin se estää rakenteessa olevien epäpuhtauksien pääsyn sisäilmaan sekä diffuusion että konvektion avulla. (Laine 2014, 78–79; Jokipii 2014, 25).

Komulainen, Huttunen ja Sänntti (2010, 100) esittävät kapselointikorjausta korvaavana tai täydentävänä korjausmenetelmänä, kun korjattaviin rakenteisiin on imeytynyt haihtuvaa haitta-ainetta. Erilaisina kapselointimenetelminä he esittävät metallilaminaattikalvoa tai -kermiä, epoksinnoitetta tai muuta materiaalia. Edellytyksenä tuotteelle on se, että sillä on tutkittu diffuusiovastus ja sen riittävyys kapseloitavaa yhdistettä vastaan on selvitetty.

Kapseloinnilla tarkoitetaan tässä työssä hyvin suuren diffuusiovastuksen omaavan rakennekerroksen asentamista mineraalisen materiaalin päälle. Tarkoituksena on estää tai hidastaa merkittävästi yhdisteiden emittoitumista sisäilmaan. Kapselointiin käytetään yleisesti tarkoitukseen suunniteltuja höyrynsulku- ja kapselointiepokseja. (Jokipii 2014, 25).

Osaa mahdollisista haitallisista aineista ei voida täysin kapseloida. Yleisimpinä näistä ovat öljyhiilivety-yhdisteet. (Komulainen ym. 2010, 101; Laine 2014, 76).

2.1 Sisäilman epäpuhtaudet

Rakennusten sisäilmaan kiinnitetään entistä enemmän huomiota, koska ihmiset viettävät yhä enemmän aikaa sisätiloissa – jopa noin 90 prosenttia päivittäisestä ajasta. Keskimääräinen aikuinen ihminen hengittää päivässä 15–20 m³ ilmaa. Tällöin ilmanlaatu on tärkeässä osassa ihmisen hyvinvointia. (Kuivikko, 2018a).

Sisäilmaan ja sen laatuun vaikuttavia tekijöitä on useita: rakennusmateriaalit, kalusteet, laitteet ja itse ihmisen toiminta. Myös ulkoilma voi vaikuttaa sisäilman laatuun epäsuorasti esim. korvausilman välityksellä. (Kuivikko, 2018a).

Sisäilmassa voi olla monista lähteistä tulleita epäpuhtauksia. Taulukossa 1 on esitelty niistä yleisimmät. Taulukon perusteella suhteellisen pieni osa mainituista epäpuhtaudenlähteistä on suoraan rakenteiden materiaali-päästöistä tai niiden materiaalien kosteusvaurioista johtuvaa. Tässä tutkimuksessa käsiteltävät haittatekijät on korostettu kyseiseen taulukkoon punaisella katkoviivalla.

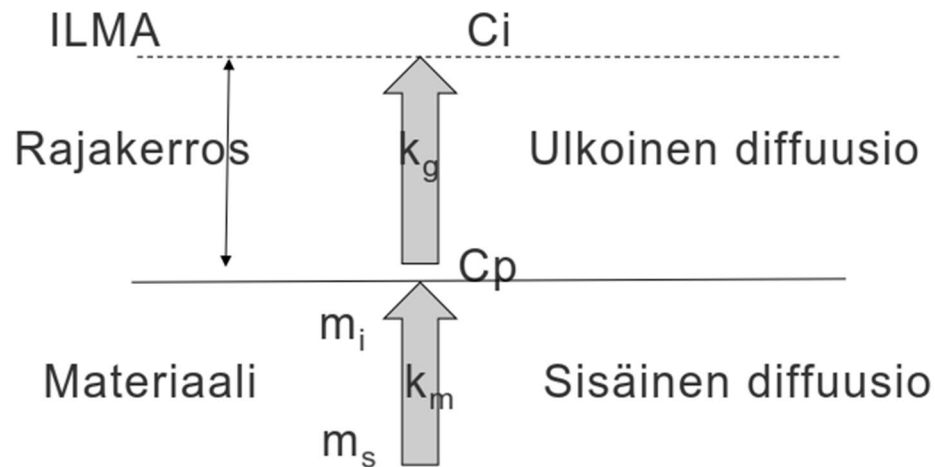
Taulukko 1. Yleisimmät sisäilman laatua heikentävät tekijät ja niiden aiheuttamat haitat ja oireet (Ympäristöministeriö 2016, 15 mukailen).

Epäpuhtaus tai muu haittatekijä	Tavanomainen lähde/syy	Haitta / oire
Allergeenit	Koti- ja lemmikkieläimet, siitepölyt, kemikaalit, pöly- ja varastopunkit, mikrobikasvustot	Allerginen nuha, silmä-, astma- ja iho-oireilu
Ammoniakki	Materiaalien kosteusvauriot, viemärit, lemmikkieläimet, tupakointi	Hajuhaitat, ärsytysoireet
Asbestikuidut	Useat eri rakennusmateriaalit	Syöpäriskin kasvu, asbestoosi
Formaldehydi	Lastulevyn ym. materiaalien kosteusvauriot, sisustustuotteet, tekstiilit ja pesuaineet	Hajuhaitat, ärsytysoireet, kosketusihottuma, syöpäriskin kasvu.
Hiilidioksidi (CO ₂)	Ihmiset, lemmikkieläimet, heikko ilmanvaihto	Suuri pitoisuus viittaa tilojen käyttöön nähden riittämättömään ilmanvaihtoon. Erittäin korkeissa pitoisuuksissa väsymys, päänsärky.
Hiilimonoksidi (häkä, CO)	Tulisijat, liikenne	Häkämyrkytys, tukehtumiskuolema
Häiritsevät hajut	Materiaalien kosteusvauriot, ilmuuodot rakenteista, materiaalit, kemikaalit, käyttäjät	Ärsytysoireet, epämukavuus
Vähäinen ilmanvaihtuvuus	Heikkotehoinen ilmanvaihto, IV-järjestelmän viat, ilmanjaon puutteet	Epäpuhtauksien kertymisestä aiheutuva oireilu ja epämukavuus
Liiallinen alipaineisuus rakennuksen ulkovaipan yli	Ulkoilmavirtoihin nähden liialliset poistoilmamäärät	Epäpuhtauksien kulkeutuminen rakenteista sisäilmaan
Kuiva sisäilma	Kylmä ja kuiva ulkoilma	Ihon ja limakalvojen ärsytysoireet, oireiluerkkyden kasvu
Lämpötila, liian matala tai korkea, vetoisuus	LVI-järjestelmän puutteet ja säätövirheet, pintasäteily, ilmuuodot	Epämukavuus, sairastavuuden lisääntyminen
Mikrobit ja niiden aineenvaihduntatuotteet	Kosteus- ja mikrobivauriot, ilmuuodot rakenteista, IV-kanaviston epäpuhtaudet kosteissa järjestelmänosissa	Hengitystieärsytys, astma, allergiset sairaudet, hengitystieinfektioiden lisääntyminen, yleisoireet
Otsoni	Ilmanpuhdistimet, kopiokoneet	Hengitysteiden ärsytysoireet. Voimistaa allergeenien vaikutusta
PAH-yhdisteet	Vanhat kosteuseristeet, kivihiilipiki, polttotapahtumat	Hajuhaitat, syöpäriskin kasvu
PCB	Rakennusmateriaalit, mm. elementtisaumaussmassat ja maalit, lämmönsiirto- nesteet	Syöpäriskin kasvu
Pienhiukkaset	Ulkoilma (teollisuus, liikenne), tupakan savu, kopiokoneet, kosteusvauriot, pienpoltto, kynttilät ja tulisijat	Viihtyvyyshaitat, sydän- ja hengityselinsairaudet, astma
Radon	Maaperä, rakennuksen alustäyttö	Keuhkosyöpäriskin kasvu
Teolliset mineraalivillakuidut	Lämmön- ja ääneneristysmateriaalit rakenteissa ja IV-järjestelmässä	Silmien ja hengitysteiden ärsytysoireet
VOC-yhdisteet (haihtuvat orgaaniset yhdisteet, engl. volatile organic compounds)	Kosteusvauriot, rakennusmateriaalit, sisustusmateriaalit, tekstiilit, pesuaineet, kosmetiikka, ihmiset ja lemmikkieläimet	Ärsytysoireet, astma
Öljyhiilivedyt	Rakennusmateriaalit (mm. valuasfaltti), öljyvahingot rakenteisiin ja maaperään rakennuksen alla	Hajuhaitat

2.2 Emissio päästöilmionä

Kuten aiemmin mainittiin, työssä käsitellään tarkemmin haitta-aineita, joista erittyä tai emittoituu haihtuvia aineosia, jotka läpäisevät rakenteita diffuusion avulla.

Kuivikko (2018b) määrittelee emission seuraavasti: "materiaalista vapautuu yhdistettä kaasumaisessa olomuodossa". Haihtuvia emissioita ilmaistään haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuudella (RIL 2014, 49). Rakennusmateriaaleista emissiota voidaan kuvata kahdella fysikaalisella prosessilla: ulkoisella ja sisäisellä diffuusiolla. Tätä prosessia on kuvattu kuvassa yksi.



Kuva 1. Emissio Sparksin mukaan (Kuivikko 2018b mukaillen)

Sisäinen diffuusio kuljettaa epäpuhtauksia materiaalin pintaa kohden ja ulkoinen diffuusio tapahtuu kiinteän materiaalin pinnalta ympäröivään ilmaan. Kuvassa k_m tarkoittaa materiaalifaasin massasiirtovakiota, kun taas k_g on kaasufaasin massasiirtovakio. C_p ja C_i ovat pitoisuudet pinnalla ja ilmassa. Esimerkiksi ulkoinen emissionopeus voidaan laskea tiettyä ajan hetkenä kaavalla (1). (Kuivikko 2018b; ks. myös Guo, Sparks, Tichenor & Chang 1998, 234).

$$SER = D/\delta \cdot (C_p - C_i) \quad (1)$$

, jossa

SER = Specific Emission Rate = emissionopeus [$\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]

D = diffuusiokertoimen [m^2/s]

δ = rajakerroksen paksuus [m]

C_p = pitoisuus pinnalla [mg/m^3]

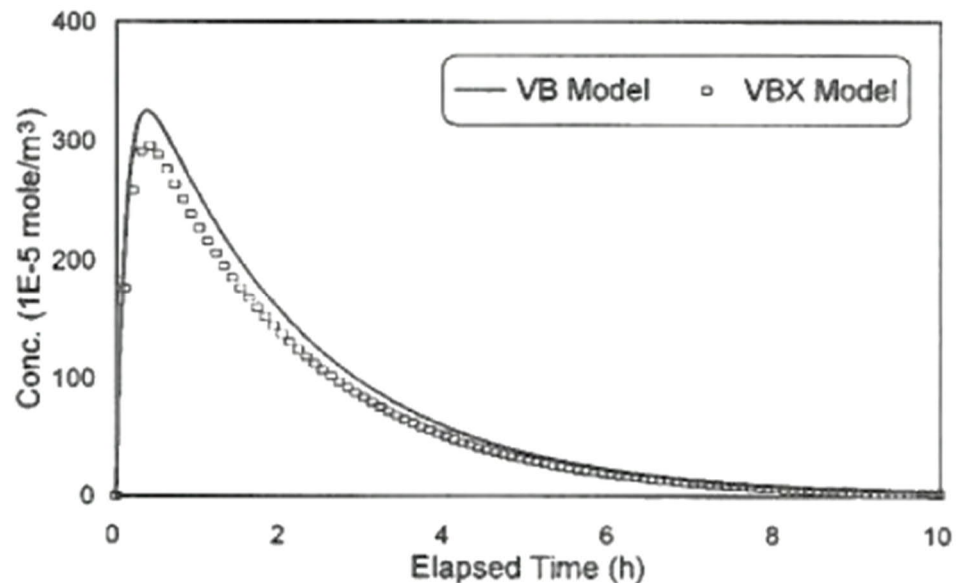
C_i = pitoisuus ilmassa [mg/m^3]

Kaavassa (1) on esitetty emission suuruus vain yhdellä ajan hetkellä. Emission määrä vähenee kuitenkin aineen pitoisuuden pienentyessä materiaalissa. (Kuivikko 2018b; ks. myös Guo ym. 1998, 234).

Yleissääntönä voidaan todeta yhdisteiden kiehumispisteen toimivan indikaattorina sen päästöherkkyydestä. Eli mitä alempi aineen kiehumispiste on, sitä helpommin se emittoituu sisäilmaan. Esimerkiksi PAH-yhdisteiden alhaisimman kiehumispisteen omaavan naftaleenin (C_{10}H_8) kiehumispiste on $218\text{ }^\circ\text{C}$, sitä pidetäänkin yhtenä PAH-yhdisteiden indikaattoriyhdisteenä

ja sille on määritetty toimenpideraja. (Työterveyslaitos (2018b); Kuivikko 2018b).

Kuvassa kaksi on esitetty synteettisen liuottimen TVOC-emissiot yleisesti ajan suhteen laskennallisesti mallinnettuna. Kuvasta voidaan todeta, että päästöt ovat suuret yhdisteen ollessa tuore. Ajan kuluessa emissio vähenee, tasaantuu ja lähestyy nollaa. Tämä johtuu materiaalin pinnan pitoisuuden pienenemisestä, jonka seurauksena sisäinen diffuusio siirtää syvemmällä olevaa ainetta pintaan. (Kuivikko 2018b; ks. myös Guo ym. 1998, 234)



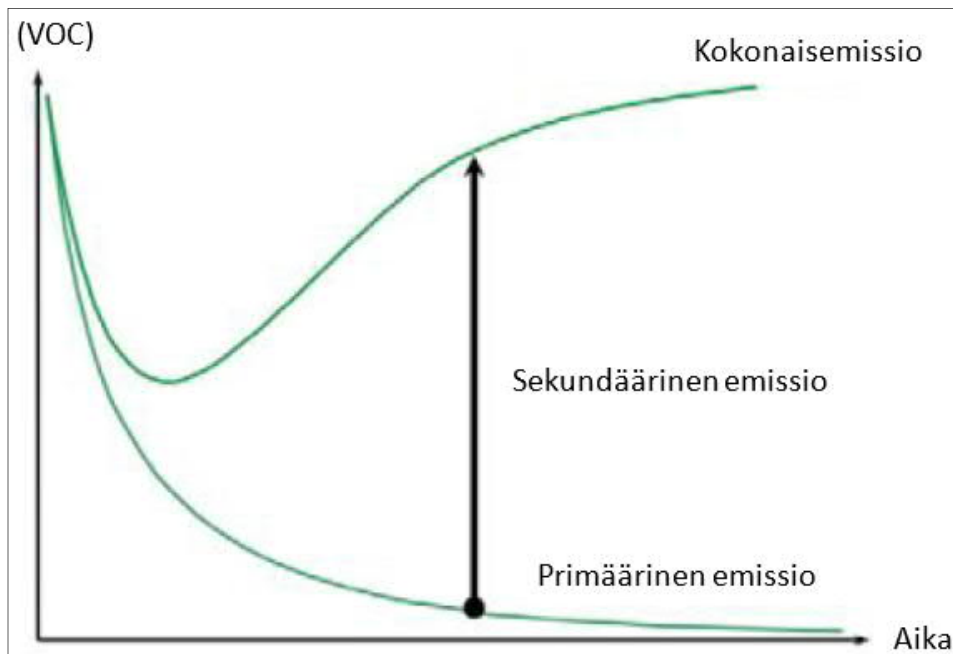
Kuva 2. Emission kehittymisen arviointi laskennallisesti (Guo ym. 1998, 234)

Kuivikko (2018b) ja Järnström (2005,19) mainitsevat että materiaalin emissioihin vaikuttavat mm. seuraavat tekijät:

- kosteus – lisää materiaalien päästöjä (sekundääriemissio)
- lämpötila – mitä korkeampi lämpötila, sitä enemmän päästöjä
- ajan kulumisen – uudella materiaalilla on suuremmat päästöt
- ilman vaihtuvuus materiaalin pinnalla – ilman liike lisää päästöjä ja pienentää adsorptiota pinnoille.

Osaa edellä mainituista tekijöistä voidaan käyttää myös päästöjen pienentämiseen. Kyseisiä menetelmiä käytetään mm. muovimattojen vaurioittamaan betonilattiaan, jota lämmittämällä ja tuulettamalla saadaan betonilattian emissioita lisättyä halutulla ajanjaksolla, jolloin aineen kokonaispitoisuus materiaalissa pienenee hyväksyttävälle tasolle. (Jokipii 2014, 22–24).

Materiaalin vaurioituessa se voi alkaa hajota kemiallisesti, jolloin materiaalin kokonaispäästöt voivat kasvaa paljonkin. Näitä ylimääräisiä emissioita kutsutaan sekundääriemissioiksi. Kokonaispäästöt koostuvat ominaispäästöistä eli primääriemissioista ja sekundääriemissioista. (Säteri 2018).



Kuva 3. Kokonaisemissioiden materiaalin vaurioitilanteessa (Säteri 2018 mukailen)

2.3 Kapseloitavat haitta-aineet ja epäpuhtaudet rakenteissa

Rakennustuotteissa on kautta aikain käytetty raakamateriaaleja, joiden on myöhemmin todettu olevan riski ympäristölle. Myös rakennuksen käytön seurauksena rakenteeseen on esim. voinut imeytyä jotain ylimääräistä ainetta, joka on saastuttanut lopullisen rakenteen. (Komulainen ym. 2010, 99–105).

Haitta-aineita on myös monenlaisia. Tässä opinnäytetyössä keskitytään sellaisiin rakennuksissa esiintyviin haitta-aineisiin, joissa on haihtuvia ainesosia, joita pyritään rajoittamaan rakenteiden kapselointikorjauksissa. Rajaus käsiteltävissä aineissa koskee käytön aikaista päästölähdettä.

Tässä luvussa käsiteltävät aineet ja ilmiöt ovat:

- öljyhiilivedyt
- muovimattojen vaurioitumisen yhteydessä vaurioituneet betonirakenteet (imeytyneet kemialliset yhdisteet ja laatan VOC-päästöt)
- vanhojen vesieristeiden PAH-yhdisteet
- mikrobien aineenvaihduntatuotteet (MVOC).

2.3.1 VOC-yhdisteet

VOC on lyhenne englanninkielisistä sanoista Volatile Organic Compounds (suomeksi haihtuvat orgaaniset yhdisteet). Haihtuville yhdisteille on myös tehty tarkennettuja määrittämiä mm. aineiden kiehumispisteiden perusteella. Hyvin harvalle VOC-yhdisteelle on määritetty erillinen raja-arvo,

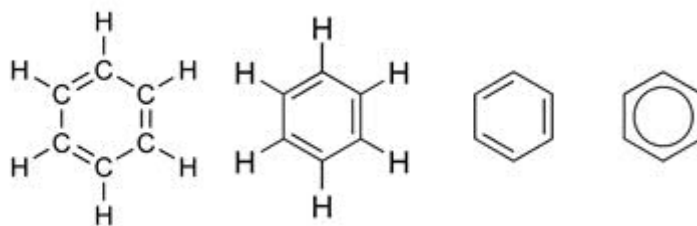
mutta yksittäiselle yhdisteelle on rajattu maksimipitoisuudeksi $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaismäärä TVOC-arvoksi $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mitattuna tolueeniekvivalenttina. Edellä mainittuja arvoja pidetään toimenpiderajoina. (Ympäristöministeriö 2016, 67–70).

VOC-yhdisteet syntyvät rakennuksen rakennus- ja sisustusmateriaaleista sekä toiminnasta rakennuksessa. Merkittävänä lähteenä toimii kuitenkin rakennusmateriaalit, jotka vaurioitumattominakin muodostavat suuren osan sisäilman VOC-yhdisteistä. Näitä kutsutaan ominaisemissioiksi tai primääriemissioiksi, ja ne tyypillisesti vähenevät ajan kuluessa. Sekundääriemissioiksi kutsutaan materiaalien kemiallisten hajoamis- tai reaktiotuotteiden aiheuttamia päästöjä. (Ympäristöministeriö 2016, 68; Jokipii 2014, 5).

Mikrobien on todettu erittävän myös haihtuvia orgaanisia yhdisteitä aineenvaihduntatuotteinaan. Näitä yhdisteitä kutsutaan nimellä MVOC eli Microbial Volatile Organic Compounds. Vaikka MVOC-yhdisteitä on tutkittu paljon, niiden mittauksella ei saada luotettavaa tietoa mikrobivaurioiden esiintymisestä, koska mikrobien tuottamien MVOC-yhdisteiden pitoisuudet sisäilmassa ovat pieniä sekä useat vahingoittumattomat materiaalit emittoivat samoja yhdisteitä. (Ympäristöministeriö 2016, 68).

2.3.2 PAH-yhdisteet

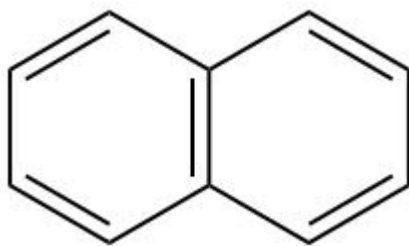
Polysykliset aromaattiset hiilivedyt (PAH-yhdisteet) ovat kahdesta tai useammasta, maksimissaan seitsemästä, liittyneestä bentseenirenkaasta koostuvia yhdisteitä, ja niitä tunnetaan yli sata erilaista yhdistettä. Kuvassa neljä on esitetty bentseenin (C_6H_6) tasomainen rakenne, joka koostuu hiili- ja vetyatomeista. Bentseeni on aromaattinen hiilivety ja esiintyy huoneenlämmössä värittömänä nesteenä. (Douben 2003, 3; Ympäristöministeriö 2016, 78; Työterveyslaitos 2018b).



Kuva 4. Bentseenin rakennekaava eri tavoin esitettynä (Wikipedia 2018b mukailten, ks. myös Wikipedia 2018a).

Toisin kuin yksittäisistä bentseenirenkaista koostuvat yhdisteet, PAH-yhdisteet ovat kiinteitä huonelämpötiloissa, ja niiden kiehumispisteet ovat korkeita, mikä voidaan todeta myös taulukosta 2. Kuvassa viisi on esitetty naftaleenin rakennekaava. Naftaleeni koostuu kahdesta bentseenirenkaasta, ja sitä pidetään yhtenä indikaattorina PAH-yhdisteiden

esiintymisen osalta sisäilmassa, sillä sen kiehumispiste on PAH-yhdisteistä alhaisin. (Douben 2003, 3; Ympäristöministeriö 2016, 78–81).



Kuva 5. Naftaleenin rakennekaava (Douben 2003, 55 mukailen)

PAH-yhdisteet on myös määritelty syöpää aiheuttaviksi yhdisteiksi, ja ne esiintyvät usein palamistuotteiden yhteydessä. Altistuminen kyseisille yhdisteille tapahtuu yleensä ihon, hengitysteiden tai ruuansulatuselimistön kautta. (Douben 2003, 4).

Taulukko 2. PAH-yhdisteiden fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia (Työterveyslaitos 2016, 4 mukailen).

Yhdiste	Molekyyli- kaava	Mooli- massa (g/mol)	Sulamis- piste (°C)	Kiehumis- piste (°C)
Naftaleeni ¹	C ₁₀ H ₈	128	81	218
Asenaftyleeni ¹	C ₁₂ H ₈	152	92	280
Asenafteeni ¹	C ₁₂ H ₁₀	154	95	279
Fluoreeni ¹	C ₁₃ H ₁₀	166	115	295
Fenantreeni ¹	C ₁₄ H ₁₀	178	101	340
Antraseeni ¹	C ₁₄ H ₁₀	178	216	342
Fluoranteeni ¹	C ₁₆ H ₁₀	202	109	375
Pyreeni ¹	C ₁₆ H ₁₀	202	150	393
Bentso[a]antraseeni ¹	C ₁₈ H ₁₂	228	161	400
Kryseeni ¹	C ₁₈ H ₁₂	228	253	448
Bentso[b]fluoranteeni ¹	C ₂₀ H ₁₂	252	168	481
Bentso[k]fluoranteeni ¹	C ₂₀ H ₁₂	252	215	480
Bentso[a]pyreeni ¹	C ₂₀ H ₁₂	252	178	496
Indeno[1,2,3-cd]pyreeni ¹	C ₂₂ H ₁₂	276	164	536
Bentso[g,h,i]peryleeni ¹	C ₂₂ H ₁₂	276	278	545
Dibentso[a,h]antraseeni ¹	C ₂₂ H ₁₄	278	267	524
Koroneeni	C ₂₄ H ₁₂	300	439	525
Dibentso[a,l]pyreeni	C ₂₄ H ₁₄	302	na	595

¹ Ns. "EPA-PAH 16" -yhdisteet eli yleisimmin määritetyt PAH-yhdisteet.

PAH-yhdisteiden esiintymiselle on määritetty muutamia viitearvoja eri yhdisteille, sekä PAH(16)-summakonsentraatio, jonka eri yhdisteet on esitetty taulukossa 2. Tällä summakonsentraatiolla arvioidaan

purkumateriaalien jäteluokitusta sekä purkutöiden suojaustarvetta. Tämän lisäksi on esitetty, ettei sisätilassa saa esiintyä PAH-yhdisteille ominaista "ratapölkyn" hajua. (Ympäristöministeriö 2016, 78–79).

Rakentamisessa PAH-yhdisteitä on käytetty pääosin vesieristeissä, katto-maalissa ja kattuhuovissa. Muita tuotteita, jotka sisältävät PAH-yhdisteitä, ovat muut bitumituotteet, tervatut langat, punokset sekä tervapaperit ja -pahvit. Suomessa esiintyvyyssajanjakso 1900-luvulla kestää ajanjakson alusta ainakin 1960-luvun loppuun asti, kuten taulukosta kolme voidaan todeta. Kivihiilipien esiintyvyys kirjallisuuslähteissä kestää vain 40 luvun loppuun asti. (Ympäristöministeriö 2016, 76; Sirviö 2007, Liite 1; ks. myös Koskela 2017).

Taulukko 3. Haitta-aineiden esiintyvyys 1900–2010 (Ympäristöministeriö 2016, 76)

	Asbesti	Mineraaliöljyt	PAH-yhdisteet (kreosootti)	PCB-yhdisteet	Metalli-yhdisteet
... 1900	käytetty	käytetty	käytetty	käytetty	käytetty
1900–1930	käytetty	käytetty	käytetty	käytetty	käytetty
1930–40	käytetty	käytetty	käytetty	käytetty	käytetty
1940–50	käytetty	käytetty	käytetty	käytetty	käytetty
1950–60	käytetty	käytetty	käytetty	käytetty	käytetty
1960–70	käytetty	käytetty	mahdollisesti	käytetty	käytetty
1970–80	käytetty	käytetty	mahdollisesti	mahdollisesti	käytetty
1980–90	käytetty	käytetty	mahdollisesti	ei tiedossa ¹⁾	käytetty
1990–2000	mahdollisesti	käytetty	mahdollisesti	ei tiedossa ¹⁾	käytetty
2000–2010	ei tiedossa ¹⁾	käytetty	ei tiedossa ¹⁾	ei tiedossa ¹⁾	käytetty

1) Ei tunnettua käyttöä ko. vuosikymmenenä

PAH-yhdisteet esiintyvät ilmassa sitoutuneena pölyihin ja muihin hiukkasiin (Työterveyslaitos 2016, 4).

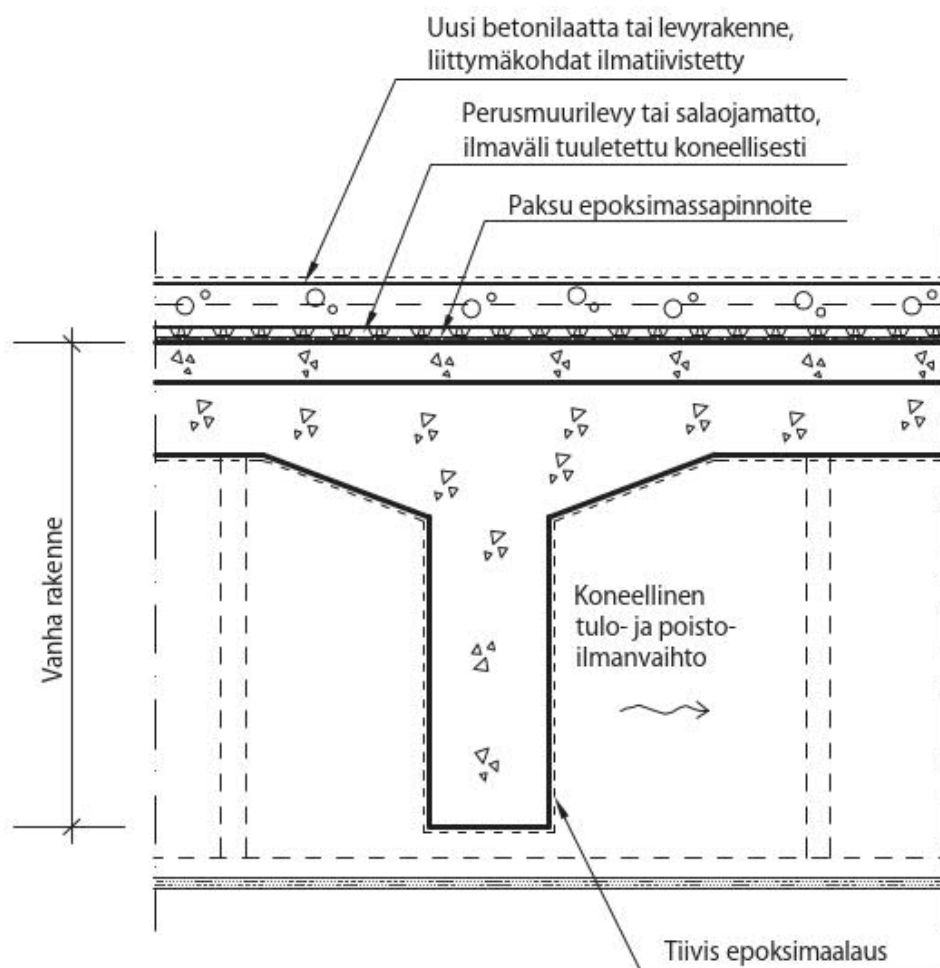
2.3.3 Öljyhiilivedyt

Rakennuksista tai rakennusmateriaaleista löytyneet öljyhiilivedyt ovat tyyppillisesti peräisin öljyvahingoista. Myös bitumipohjaisien valuasfalttien valmistuksessa on käytetty öljyä sekä aromaattisia yhdisteitä, esim. syöpävaarallisia BTEX-yhdisteitä (bentseeni, tolueni, etyylibentseeni ja ksyleenit). (Laaksonen 2015, 17; ks. myös Komulainen ym. 2011, 100; Koskela 2017).

Öljyhiilivetyjen ominaisuuksia voidaan tarkastella niiden hiiliatomien lukumäärän mukaisesti. Niin kuin PAH-yhdisteissäkin, pienemmän atomiluvun yhdisteet haihtuvat herkemmin kuin suuren hiiliatomiluvun. Haitta-ainetutkimuksissa nopeimmin haihtuvia kevyitä bensiinijakeita C₅ – C₁₀ ei välttämättä tutkita. Sen sijaan keskiraskaat tisleet (C₁₀ – C₂₁), raskaat jakeet (C₂₂ – C₄₀), öljyhiilivedyt (C₂₀ – C₄₀) ja BTEX-yhdisteet tulisi aina ohjeistaa

analysoimaan erikseen. (Laaksonen 2015, 17; ks. myös Ympäristöministeriö 2016, 79).

Öljyhiilivetyjä löydetään yleensä konepajojen, huoltoasemien ja tuotantolaitosten yhteydestä. Myös rakennusten sisäiset öljyvudot ja etenkin vuotavat öljysäiliöt ovat tavallisimpia lähteitä. (Koskela 2017).



Kuva 6. Esimerkkikorjaustapa mineraaliöljyllä vaurioituneesta välipohjarakenteesta (Komulainen ym. 2011, 106).

Öljyhiilivedyt pyrkivät ympäristönsä suhteen kemialliseen tasapainotilaan. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että huokoiset materiaalit voivat imeä itseensä suuriakin määriä öljyä. (Laaksonen 2015, 17).

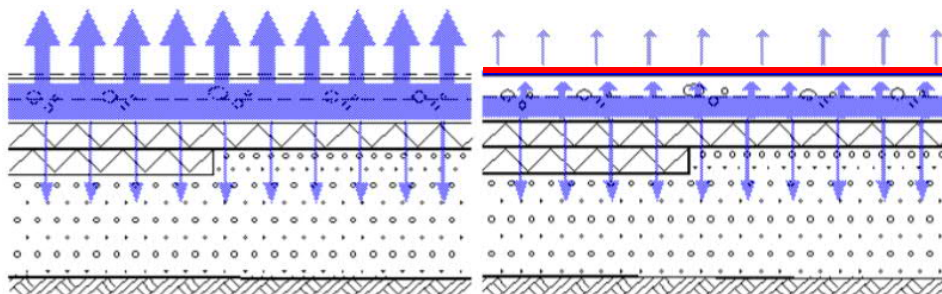
Öljyhiilivetyjä ei pystytä täydellä varmuudella kapseloimaan epoksipohjaisilla kapselointiaineilla vaan esimerkiksi metallipohjaisella absoluuttisen tiiviillä kalvolla, esim. metallipintaisella bitumikermillä tai vaihtoehtoisesti rakenteen tuuletuksen ja kapselointikäsittelyn yhdistetyllä korjaustavalla, kuten kuvassa kuusi on esitetty. (Komulainen ym. 2011, 100).

Öljyhiilivetyvaurioituneiden rakenteiden korjausta ei tarkastella tässä työssä tarkemmin.

2.3.4 Muovimatto-ongelma

Muovimatoilla tässä yhteydessä tarkoitetaan joko linoleum- tai vinyylimattoja, mutta päästöt voivat johtua myös mattoliimoista, joilla muovimatot liimataan alustaansa (Säteri 2018).

Muovimatto-ongelma liittyy pääasiallisesti betonilattian päällystämiseen tiiviillä muovimatolla, ja sillä viitataan ilmiöön, joka on esitetty kuvassa seitsemän. Kun betonilaatta valetaan, se saattaa sisältää paljon ylimääräistä vettä, joka ei sitoudu betonin hydrataatiossa ja vaatii aikaa haihtuakseen. Jos laatta päällystetään liian aikaisin tiiviillä pinnoitteella siten, että laatan kokonaiskosteuspitoisuus on liian korkea, alkavat muovimaton tai mattoliiman kemialliset yhdisteet reagoida kosteuden kanssa ja sitä kautta lisäävät muovimaton sekundääriemissioita (Leivo & Rantala 2002b, 14; Säteri 2018).

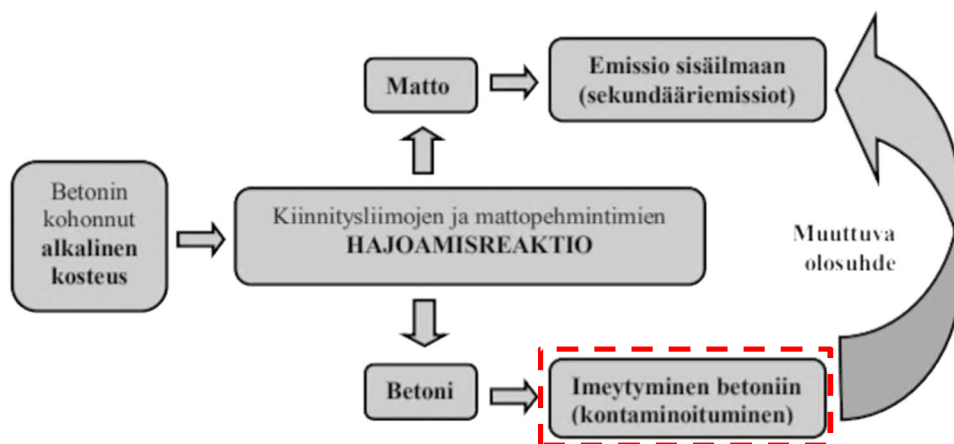


Kuva 7. Maanvaraisen laatan rakennuskosteuden poistuminen ennen (vasemmalla) ja jälkeen (oikealla) pinnoittamisen (Leivo & Rantala 2002b, 14 mukaillen).

Säteri (2018) huomauttaa, ettei ongelma esiinny ainoastaan liian aikaisin päällystetyissä laatoissa, vaan jokin seuraavista ulkoisista lähteistä voi myös nostaa kosteustasoa:

- siivousvedet
- vesivahingot, esim. putkistovuodoissa
- maaperän kosteus.

Alla olevassa kuvassa kahdeksan on esitetty kaavio liiallisen kosteuden ja betonin alkalisuuden aiheuttamista hajoamisreaktioista ja vaikutuksista sisäilman sekundääriemissioihin sekä betonin kontaminoitumiseen. Betonin kontaminoituessa siitä tulee uusi päästölähde sisäilmaan. Tämä vauriomekanismi on ongelmallinen, koska vaikka lisäkosteuden lähde saataisiin eliminoidua ja vaurioitunut muovimatto vaihdettua, emissiot sisäilmaan saattavat pysyä korkealla tasolla betonin päästöjen takia. (Kolu 2013, 25–27).



Kuva 8. Kaavio alkalisen kosteuden aiheuttaman mattoliiman sekundääriemissioiden synnystä (Merikallio, Niemi & Komonen 2007, 38; Kolu 2013, 26 mukaillen).

Yleensä muovimatoista puhuttaessa tarkoitetaan vinyylimattoja, jolla viitataan maton runkomateriaaliin polyvinyylilokloridiin (polyvinyl chloride, PVC), joka on vinyylilokloridimonomeereista koostuva polymeeri. Mattoon lisätään pehmittinaineita lisäämään sen taipuisuutta ja työstettävyyttä. Pehmittinaineet eivät sitoudu PVC-muoviin, minkä takia vinyylimatoista haihtuu ominaispäästöjen lisäksi pehmittimien emissioita. Erityyppisissä vinyylilattiapäällysteissä on erisuuruisia määriä pehmittimiä, ja markkinoilla on myös kokonaan pehmittinvapaita tuotteita. (Säteri 2018; Hometalkoot n.d.)

Toinen käytetty mattotyyppi on linoleum-matto, joka valmistetaan pääosin luonnollisista raaka-aineista: puujauhasta, pellavansiemenöljystä, pihkasta, kalkkikivestä sekä väri- ja lisäaineista. Alustana toimii juuttikangaspohja. Linoleumin VOC-emissiot ovat peräisin biologisista lähteistä, jotka ovat alttiimpia tuottamaan matalan hajukynnyksen yhdisteitä, joita vapautuu koko lattiapäällysteen käyttöajan ajan. Pohjan juuttikangas on myös altis mikrobivaurioille kosteissa olosuhteissa. (Säteri 2018; Hometalkoot n.d.)

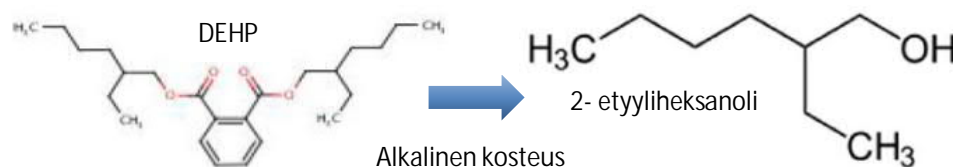
Muovimattovaurioita ja niiden emissioita tarkasteltaessa tulee huomioida päällysteen lisäksi myös tasoitteen, pohjustusaineen ja liiman ominaispäästöt (Säteri 2018; Hometalkoot n.d.). Tasoitteita ja liimoja tarkasteltaessa olisi hyvä tietää mattotyön asennusajankohta, koska tasoitteiden ja liimojen sideaineena on käytetty esimerkiksi kaseiinia sekä muita eläinproteiineja (Ympäristöministeriö 2016, 75). Vastapainona on mattoliimoissa käytetty 80-luvulle asti liuotinpohjaisia liimoja, jotka kestävät korkeampia kosteuspitoisuuksia. 90-luvulla siirryttiin vesipohjaisten mattoliimojen käyttöön ja vuoteen 1995-asti niissä käytettiin myös ftalaatteja pehmittiminä. (Säteri 2018).

Taulukko 4. Kosteudelle alttiiden materiaalien arvioituja raja-arvokosteuksia, materiaalivaurioita ja -emissioita (Järnström 2015; Hometalkoot n.d.).

Materiaali	RH (%)	Vaurio / emissio
Kaseiinipitoiset tasoitteet	75 - 85	Käymisreaktiot, hydrolyysi / ammoniakki, amiinit, rikkiyhdisteet ja alkoholit
PVC-matot ja kosteiden tilojen PVC-tapetit	>95	Värjäytyminen, hajoamisreaktiot, 2-etyyli-1-heksanoli, sekä muut hydrolyysi- ja hapettumistuotteet kuten muut alkoholit, aldehydit, ketonit ja hapot
Vesiohenteiset liimat	> 85 – 95	Saippuoituminen/materiaalikohtaiset hydrolyysi- ja hapettumistuotteet, kuten alkoholit, aldehydit, ketonit ja hapot
Ureaformaldehydipohjaiset hartsit lastulevyissä, lakoissa, eristeiden sideaineissa ja tekstiilien käsittelyaineissa	> 60 – 70	Hydrolyysi / formaldehydi
Muovimassat, injektiohartsit, maalit	Materiaali-kohtainen	Kovettumisen estyminen / monomeeriemissio
Useimmat materiaalit homehtuvat Puuperäiset materiaalit lahoavat	75 – 95 > 90	Bioaerosolit, MVOC

Kaseiinit ovat allergeeneja, ja niille voi herkistyä ihokosketuksen tai hengityksen kautta. Kosteissa olosuhteissa kaseiini hajoaa, jolloin vapautuu yhdisteitä, jotka voivat aiheuttaa sisäilmaongelmia (ks. myös taulukko 4). Kaseiinita ja helposti haihtuvista orgaanisista liuotinnisistä luovuttiin vähitellen 2000-luvun alussa (Ympäristöministeriö 2016, 75; Säteri 2018).

Kuvassa yhdeksän on esitetty betonin alkalisen kosteuden, eli korkean pH-arvon ja kosteuden yhteisvaikutuksen aiheuttama kemiallinen reaktio, jossa lopputuotteena syntyy 2-etyyliheksanolia. Tämä reaktio voi tapahtua, vaikka päällystemateriaali olisikin vähäpäästöinen. (Säteri 2018; Merikallio ym. 2007, 36–39).

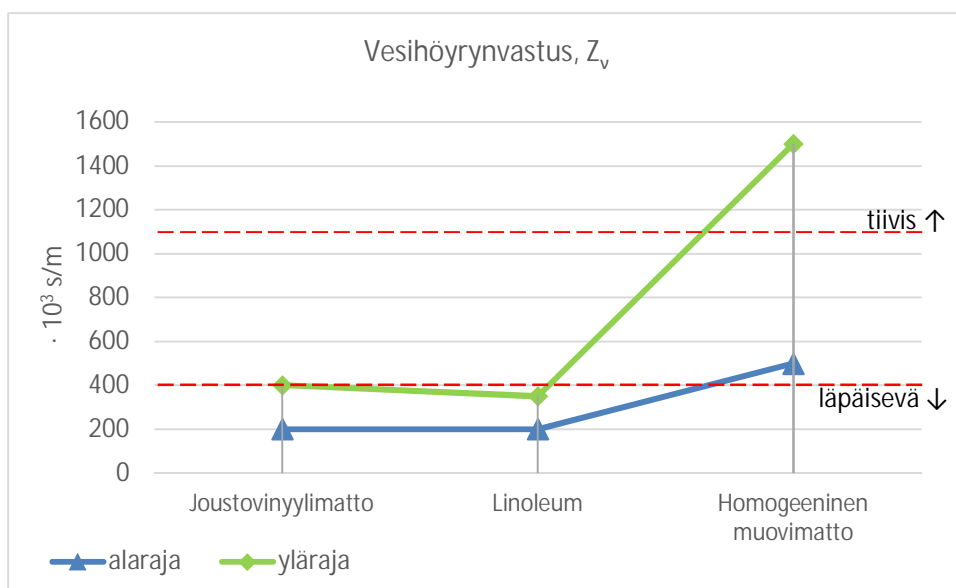


Kuva 9. Pehmittimenä käytetyn dietyyliheksaliftaatin (DEHP) hajoamistuote alkalisen kosteuden vaikutuksesta (Säteri 2018).

Edellä mainitun syntymätavan lisäksi 2-etyyliheksanolia käytetään lisäaineena mm. PVC-tuotteissa ja liimoissa, eli ns. hajoamistuotteita syntyy myös primääriemissioina (Säteri 2018). 2-etyyliheksanolia käytetään indikaattorina muovimatto-ongelmissa, ja sillä ei ole havaittu olevan muita merkittäviä vaikutuksia kuin erilaiset ärsytysoireet. Yhdisteen pitoisuudelle sisäilmassa on määritelty toimenpideraja $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ muovimatto-ongelmissa (Säteri 2018; Ympäristöministeriö 2016, 70). Uudempien muovimattojen kosteusvaurion yhteydessä sisäilmassa esiintyvien C_9 ja C_{10} -alkoholien epäillään aiheuttavan oireilua $>10\text{--}50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sisäilman pitoisuudessa (Ympäristöministeriö 2016, 70).

Lattiapinnoitetta valitessa tulee huomioida käyttöolosuhteet, kuten myös edellä on mainittu, eli kosteuden pitäisi pystyä poistumaan rakenteesta vaurioita aiheuttamatta, oli se sitten rakennekosteutta tai maaperästä nousevaa. Materiaalin vaurioitumisherkkyys ja pinnoitejärjestelmän vesihöyrynvastus vaikuttavat tähän olennaisesti. Vaurioitumisherkkyttä eri materiaaleilla on sivuttu taulukossa neljä, ja siitä voidaan todeta, että suhteellisen kosteuden raja-arvot eri materiaaleilla vaihtelevat suuresti. (Lindberg, Wahlman, Suonketo & Paukku 2002, 11).

Eri tyyppisillä muovimatoilla on suuri vaihteluväli vesihöyrynvastuksien suhteen, kuten voidaan todeta kuvasta kymmenen. Myös lattiapinnoitusjärjestelmän muilla komponenteilla, kuten tasoitteella, pohjusteella ja liimalla on oma vesihöyrynvastuksensa, jotka pitää huomioida pintarakenteen kokonaisdiffuusiovastuksessa. Kokonaisvesihöyrynvastukseen vaikuttaa materiaalin diffuusiovastuskerroin ja materiaalin paksuus. (Ympäristöministeriö 2016, 40; Lindberg ym. 2002, 36–38).



Kuva 10. Erilaisten muovimattojen ja linoleumin vesihöyrynvastuksien vaihteluvälien vertailu (RIL 2014, 442–443; Leivo & Rantala 2002b, 21).

Muovimattoja käytetään eri käyttötarkoituksiin, ja niiden rakenne voi olla homogeeninen tai kerroksellinen. Homogeenisiä tai tasa-aineisia on käytetty enemmän julkisessa rakentamisessa niiden paremman kulutuskestävyyden takia. Joustovinyylimatoissa tai kerroksellisissa muovimatoissa on yleensä kulutusta kestävä pintakalvo ja pehmeä pohjakerros. Kerroksellisia mattoja on käytetty enemmän asuinrakentamisessa. (Lindberg ym. 2002, 11; Rantala 2010; Merikallio ym. 2007, 48).

Muovimattojen paksuudet vaihtelevat 2–3 mm välillä (Lindberg ym. 2002, 11). Pinnoitteen tiiveys tai vesihöyrynvastus korreloi usein sen kulutuskestävyyden kanssa (Merikallio ym. 2007, 48). Materiaalin vesihöyrynvastukselle voidaan antaa useita eri arvoja, ja niitä käytetään teollisuudessa

ristiin. Muunnoskaavojen avulla erilaisia suureita voidaan verrata keskenään. Liitteissä 6, 7 ja 8 on esitetty tätä eri arvojen vertailua muunnoskaavojen avulla. Tässä yhteydessä käytetään suureena vesihöyrynvastusta, Z_v . Vesihöyrynvastuksen arvon kasvaessa kasvaa myös materiaalin tiiveys vesihöyryä vastaan. (RIL 2014, 389–393).

Leivo & Rantala (2002b, 21) jakavat pintarakenteet karkeasti kahteen ryhmään, läpäiseviin ja tiiviisiin pinnoitteisiin. Vesihöyrynvastuksella (Z_v) ilmaistuna rajat ovat seuraavat:

- läpäisevät pinnoitteet, $Z_v < 400 \cdot 10^3 \text{ s/m}$
- tiiviit pinnoitteet, $Z_v > 1100 \cdot 10^3 \text{ s/m}$

Läpäisevän ja tiiviin pinnoitteen raja-arvot on kuvattu myös graafisesti (puolisella katkoviivalla) kuvassa kymmenen. Samalla voidaan todeta joustovinyylimaton ja linoleum-pinnoitteiden olevan hyvin vesihöyryä läpäiseviä tuotteita, toisin kuin homogeenisten muovimattojen, joiden vaihteluvälin suurimmat arvot ylittävät tiiviiden pinnoitteiden raja-arvon.

Homogeeniset muovimatot kestävät yleensä paremmin korkeaa kosteutta kuin joustovinyylimatot. Toisaalta kosteus läpäisee joustovinyylimatot ja linoleumin kohtuullisen hyvin, joten niiden alle normaaliolosuhteissa tiivistynyt kosteus ei yleensä ylitä kriittistä 85% suhteellisen kosteuden arvoa. Tämä ei kuitenkaan välttämättä päde maanvastaisissa lattioissa. (Merikallio ym. 2007, 48–49).

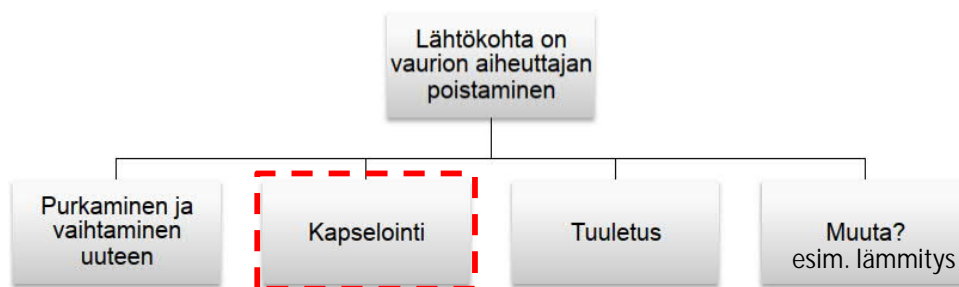
Pinnoitettujen betonilattioiden emissioiden ja suhteellisen kosteuden välillä on kuitenkin selvä korrelaatio, eli emissiot kasvavat kosteuden noustessa, ja kriittisenä betonin suhteellisen kosteuden arvona voidaan pitää 85 %. Kuitenkin käytettäessä betonirakenteen pinnassa matala-alkalista tasoitetta voivat emissiot vähentyä. (Merikallio ym. 2007, 38).

2.4 Kapselointikorjauksen syyt, menetelmät ja vaihtoehtoiset korjaustavat

Edellisissä luvun kappaleissa on esitetty rakenteita, tilanteita tai vaurioita, joiden korjauksessa voi käyttää kapselointikorjausta, joko ainoana korjausmenetelmänä tai muiden korjaustapojen yhteydessä.

Luvun kaksi johdannossa todettiin, että kapselointikorjaukseen päädytään usein kustannussäästöistä tai rakennussuojelullisista tavoitteista johtuen. Muu merkittävä syy voi olla esim. saastuneen tai haitta-ainetta sisältävän kantavan rakenteen purkamisen hankaluus. Myös kuntien hankala taloudellinen tilanne voi johtaa tarpeeseen tehdä siirtäviä korjauksia, jollaisena kapselointikorjausta voi joissain tapauksissa pitää.

Kuvassa yksitoista on esitetty erilaisia menetelmiä VOC-vaurion korjaamiseen. Samaa kaaviota voidaan hyödyntää myös muissa vauriotilanteissa, ja menetelmiä voidaan myös yhdistellä.



Kuva 11. Kaavio VOC-vaurion korjausvaihtoehdoista (Kuivikko 2018b muokailen).

Jokipii (2015, 19–26) vertaili mm. yllä esitettyjä korjaustapoja VOC-vaurion korjaamiseen. Lähtökohtana oli muovimaton vaurioittama betonilaatta. Jokipii vertaili korjausvaihtoehtoja seuraavasti:

- perinteinen vaihtoehto eli koko laatan purkaminen ja uuden rakentaminen jätettiin pois vaihtoehtolistalta
- vaurioituneen maton poistaminen sekä vaurioituneen betonipinnan jyrsintä tai hionta
- kapselointiepoksin levittäminen vanhan laatan pintaan, mikä vähentää vaurioituneen betonin emissioita sisäilmaan
- lattian emissioiden lisääminen määräajaksi tuulettamalla, lämmitämällä tai näiden yhdistelmällä, mitkä vähentävät lopputilanteen emissioita
- edellisten yhdistelmillä
- asentamalla koneellisesti tuuletettu yläpinnastaan tiivislattiarakenne (ei tehty koekorjausta)
- kemiallisella käsittelyllä (ei tehty koekorjausta)
- kaikkien vertailtujen korjausvaihtoehtojen pintaan asennettiin uusi muovipäällyste.

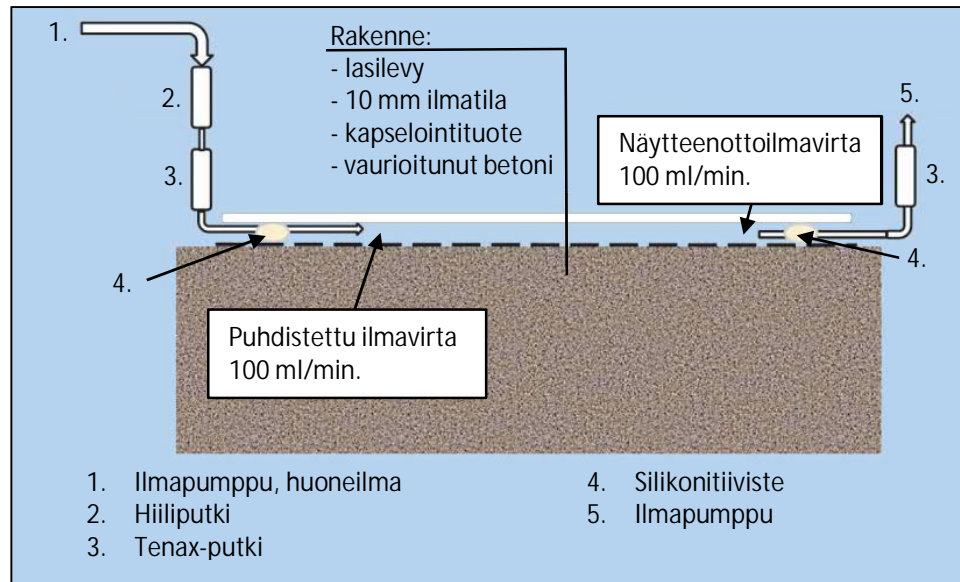
Huomioitavaa Jokipiin (2015, 74–77) tutkimuksessa oli se, että yhdellä kapselointiepokseista todettiin olevan erittäin suuret primääriemissiot, joten tässäkin tapauksessa tuotteiden välillä on eroja. Tutkimuksessa havaittiin myös, että kapselointikorjauksella ei välttämättä saavutettu parempia tuloksia muihin korjaustapoihin verrattuna, vaan erona oli se, että kapselointikorjaukseen käytetty kokonaisaika oli muita korjaustapoja lyhyempi.

Haitta-aineen kapselointia voidaan tehdä myös muilla menetelmillä kuin epoksilla. Grantén (2015, 40) on tutkinut mm. seuraavia tuotteita kosteus-sulkuepoksen lisäksi.

- muovinen nystyrälevy (HD-polyeteenistä ja polypropyleenistä), jota ei tuuletettu kokeessa, vaikka mahdollisuus siihen olisi ollut
- Florosil TS, joka on 2-komponenttinen diffuusiosulkukäsittely (ei epoksipohjainen)
- cTrap-kangas, jossa kahden vesihöyryavoimen polyesterikalvon välissä on aktiivihiihiisuodatinkerros
- Dry-Top metallilaminaatti, jossa on metallikalvo kahden muovikerroksen välissä

- Florosil-kylläste (impregnointiaine).

Kyseisestä kapselointituotteiden läpäisevyydestä tehtiin FLEC-mittaukset. Niissä todettiin ainoastaan 2-etyyliheksanolin arvot kohonneiksi ($> 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ja oletettiin sen johtuvan muovimaton vaurioitumisesta. (Grantén & Vestman 2015, 28).



Kuva 12. Periaatekaavio Grantén & Vestmanin (2015, 13 mukailleen) tutkimuksen koemittauslaitteesta.

Granténin (2015, 38) tutkimuksessa tutkittiin erilaisia tuotteita ja niiden läpäisevyyttä erilaisille yhdisteille. Tutkimuksen mittauksen periaate on esitelty kuvassa kaksitoista ja sen vaiheet olivat seuraavat:

- ennen toimenpiteitä
 1. poistettiin lattian pinnoitemateriaali ja hiottiin betonin pinta puhtaaksi liimasta
 2. otettiin betonin materiaalinäytteet ja analysoitiin ne vaurion toteamiseksi
- korjaustoimenpiteet, jotka tehtiin noin 1 m^2 pinta-alalle
 3. vaurioituneelle betonipinnalle asennettiin kapselointituote valmistajan ohjeen mukaan
- mittausten esivalmistelut
 4. asennettiin lasilevy 10 mm tutkittavan pinnan yläpuolelle ja suljettiin kaikilta sivuilta silikonitiivistein
 5. Ilmatilan tulo- ja poistoilmalle valmistellaan mittauspisteet
- mittaukset suoritettiin 1 kk sekä 6 kk jälkeen koekorjauksesta
 6. ilmatilasta otettiin näyte lisäämällä puhdistettua ilmaa yhdeltä sivulta ja keräämällä näyte vastakkaiselta puolelta
 7. näyte lähetettiin analysoitavaksi.

Kyseisessä tutkimuksessa huomioitiin mahdollisen pinnoitteen asennus kapseloinnin pintaan lasilevyllä. Lasin alle jäävä ilmatila on suljettu ja siten

kuvaa kaikkien päästöjen suuruutta sulkukerroksen läpi. Tulokset eivät ole suoraan verrattavissa esim. Jokipiin tutkimukseen. (Grantén 2015, 38).

Grantén & Vestmanin (2015, 29) tutkimuksen yhteenvedossa on vertailtu 2-etyyliheksanolin päästöjä, ja tutkimuksessa löydettiin useampi tuote, jolla kyseiset päästöt saatiin alennettua tavoitetason alapuolelle. Pitää kuitenkin muistaa, että kapselointituotteen läpäisevyys pitäisi olla kuitenkin tutkittu myös kapseloitavan aineen osalta ja se ei välttämättä korreloi vesihöyrynvastuksen kanssa (Komulainen ym. 2011, 100–101). Toisin sanoen tutkimuksessa olleita tuotteita ei voi käyttää sellaisenaan kaikkiin kapselointikorjauksiin ilman lisätutkimustietoa.

Taulukko 5. Grantén & Vestmanin (2015, 28 mukailten) tutkimuksen mitaustulokset 6 kk jälkeen.

Tuote ja sen kuvaus:	Yhdisteen pitoisuus näyteilmassa[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]					
	TVOC	2-etyyliheksanoli	n-buta-noli	Tolueneeni	Hexanaali	Bentsyyli
Levitettävä tiivistysaine:						
1. NM epoksi, kosteussulkuepoksi Florosil TS, 2-komponenttinen	574	24	11	3	14	703
2. diffuusiosulkukäsittely (ei epoksi)	41	0	23	3	0	1
Tuulettamaton nystyrämatto:						
3. Polypropyleeni	103	42	9	0	8	51
4. HD-polyeteeni	159	89	17	0	9	6
Adsorboiva suodatinkerros						
5. cTrap-suodatinkangas	92	7	11	0	23	2
Metallilaminaatti (alumiini)						
6. Dry Top	18	11	3	0	0	1
Betonin pintahuokosten tiivistyskäsittely						
7. Florosil (impregnointiaine)	1030	560	523	3	0	9

Tutkimuksen lopputuloksista on vedetty yhteneviä johtopäätöksiä Jokipiin (2015, 78) tutkimuksen kanssa. Levitettävän epoksikorjauksen Työmenetelmiin ja ohjeisiin pitää kiinnittää asiaan kuuluvaa huomiota, mittausmenetelmät eivät ole vertailukelpoisia keskenään ja niitä tulisi kehittää. Harmaalla pohjalla olevat tulokset ylittävät päästörajan. (Grantén & Vestman 2015, 29).

Granténin (2015, 37) tutkimuksen yhteenvedossa listattiin myös kapselointikorjaukselle useita onnistumista vaarantavia riskejä, jotka tulisi huomioida suunnittelun ja toteutuksen aikana, mm.

- vanhojen lattiamateriaalien asentaminen kapseloinnin päälle
- puutteellinen vanhan tai vaurioituneen materiaalin poisto
- kapseloinnin tartunta tai liian ohut kerros levitettävää tuotetta esim. puutteellinen siivous tai pohjan epätasaisuus
- kaksikomponenttisten-tuotteiden sekoittaminen työmaaolosuhteissa (voi johtaa laadun vaihteluun)
- kosteusvirtojen huomioiminen (maaperän kosteus, pinnoituskosteus, mattoliiman kuivuminen jne.).

3 LÄMPÖ- JA KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA

Perinteisesti rakennusfysiikalla on tarkoitettu rakennusten ja rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä käyttäytymistä. Näiden lisäksi rakennusfysiikkaan luetaan kuuluvaksi myös akustiikka ja valaistus. Tässä luvussa ja työssä keskitytään vain lämpö- ja kosteustekniseen tarkasteluun.

Rakennuksissa havaitut viat ja vauriot liittyvät suurelta osin rakennuksen lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan, mihin myös kiristyneillä energiamääräyksillä, ilmastonmuutoksella ja sisäilman laatuvaatimuksilla on merkittävä vaikutus. Tämä korostaa rakennusfysiikan osaamisen merkitystä suunnittelussa entisestään. (Vinha 2008, 394; Mäkitalo 2012, 9–10.)

Vinha (2008, 394) esittää rakennusfysikaalisen suunnittelun perustehtävät seuraavasti:

- lämpötekniisessä suunnittelussa tulee estää rakenteiden ja materiaalien turmeltuminen, huomioida lämpöenergian kulutus sekä lämpöviihtyvyys
- kosteustekniisessä suunnittelussa tulee huomioida asunnon kosteusviihtyvyys, varmistaa rakenteiden riittävä kuivumiskapasiteetti, rajoittaa ylimääräisen kosteuden tunkeutumista rakenteisiin, ja siten estää rakenteiden ja materiaalien turmeltuminen
- sisäilman ja rakennusvaipan suunnittelussa tulee ottaa huomioon sisäilman laatu ja ilmanpitävyys.

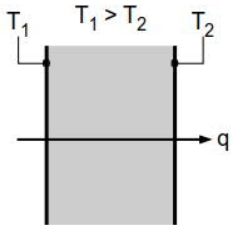
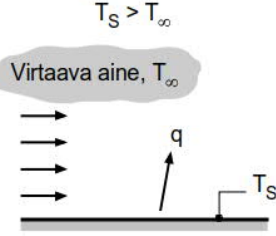
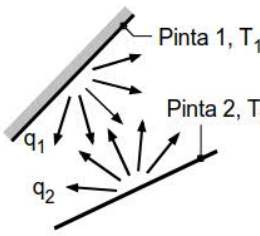
3.1 Lämpö ja lämmön siirtymismuodot

Lämpö on yksi energian muodoista, sillä tarkoitetaan aineen atomien, elektronien ja molekyylien liike-energiaa. Lämpötilan noustessa myös molekyylien liike-energia kasvaa. Molekyylien liikkeen tapa muuttuu kuitenkin myös aineen olomuodon mukaan: kaasussa ja nesteessä molekyylit liikkuvat vapaasti ja törmäilevät toisiinsa, nesteessä liike on vain rajoitetumpaa. Kiinteässä aineessa lämpö siirtyy aaltoliikkeenä ja on molekyylien sekä atomien värähtelyä, kun taas johteissa lämpö siirtyy vapaiden elektronien liikkeenä. (Vinha 2011a, 95–96; Vinha 2010, 1).

Lämmön siirtyminen tapahtuu aina korkeammasta lämpötilasta alempaan, ja kuvassa kolmesta on esitetty sen siirtymismuodot: johtuminen, konvektio ja säteily. Lämpövirta, q , on kuvattu nuolella ja lämpötilaa, T , tarkennetaan alaindeksillä. (Vinha 2011a, 95–96; Vinha 2010, 1).

Lämmön johtuminen kiinteän aineen läpi on värähtelyä, jossa atomit tai molekyylit pysyvät paikallaan. Materiaalien lämmönjohtavuuteen vaikuttavat monet asiat, kuten materiaalin tiheys, lämpötila, kosteuspitoisuus ja aineen fysikaalinen koostumus. (Vinha 2011a, 98–106; Vinha 2010, 1). Rakennusfysikaalisessa laskennassa käytetään lämmönjohtavuudelle kuitenkin useimmiten yhteisesti sovittuja ja yksinkertaistettuja arvoja, jotka on

mitattu materiaalille jossain tietyssä olosuhteessa. Johtumista ts. konduktiota esiintyy kiinteissä aineissa ja nesteissä. (Ylihärsilä 2004, 9–12; Siikanen 2014, 40).

Johtuminen kiinteän aineen läpi	Konvektio pinnasta virtaavaan aineeseen	Nettosäteily kahden pinnan välillä
		

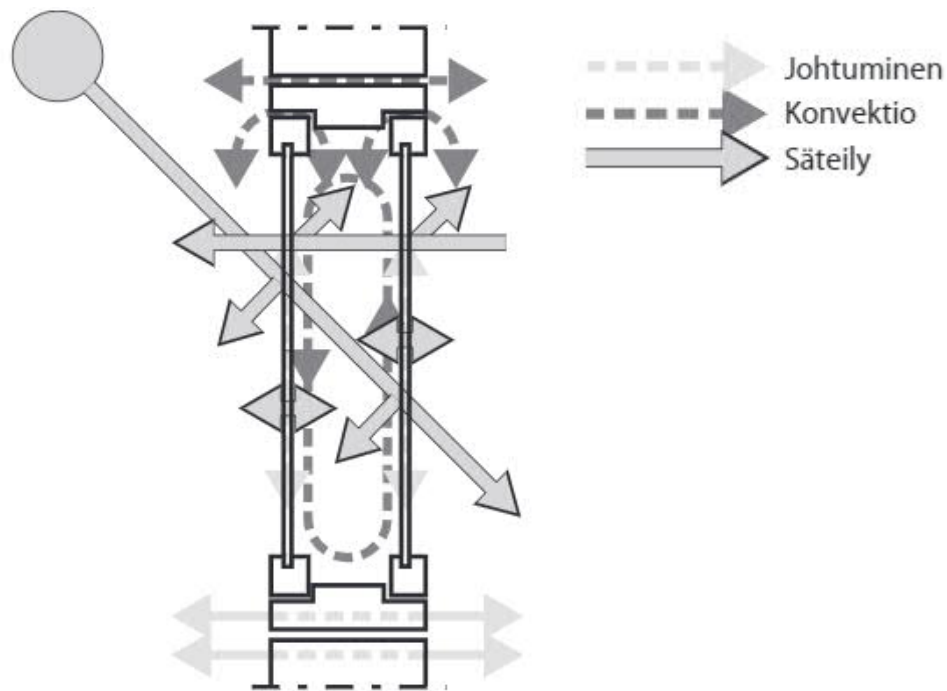
Kuva 13. Lämmön siirtymismuodot (Vinha 2010, 1; ks. myös Incropera & DeWitt & Bergman & Lavine 2007, 2)

Lämpö siirtyy konvektiossa ilma- tai nestevirtauksen mukana ja voi olla luonnollista, pakotettua tai yhdistelmä edellä mainituista. Lämpötilaerojen aiheuttama tiheysero synnyttää luonnollisen konvektiovirtauksen, kun taas pakotetussa konvektiossa ulkoinen voima aiheuttaa virtauksen nesteessä tai kaasussa. Yleisimpinä esimerkkeinä pakotetusta konvektiosta voi pitää tuulta tai koneellista ilmanvaihtoa. (Siikanen 2014, 41; Björkholtz 2004, 13).

Säteilyssä energia siirtyy sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä valon nopeudella. Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella säteilevät lämpösäteilyä. Rakennustekniikassa lämpösäteily jaetaan lyhyt- ja pitkäaaltoiseen säteilyyn. Auringon tuottama lämpösäteily on lyhytaaltoista ja muiden kappaleiden säteilemä lämpö on pitkäaaltoista säteilyä. (Björkholtz 2004, 12; Siikanen 2014, 40).

Säteilyn aallonpituudella on merkitystä muutamien materiaalien osalta. Lasi on hyvä esimerkkimateriaali ko. ilmiöstä, koska se päästää lävitseen paremmin lyhytaaltoista lämpösäteilyä ja heikommin pitkäaaltoista. Kuvassa neljatoista on kuvattu lämmön siirtymistä ikkunassa. (Björkholtz 2004, 12–13; Siikanen 2014, 40)

Lämpö siirtyy harvoin ainoastaan yhden siirtymismuodon mukaan, vaan on yhdistelmä kaikista tai osasta lämmönsiirtymismuodoista (Siikanen 2014, 40). Edellä mainittujen lisäksi on vielä faasimuutoksista vapautuva tai sitoutuva lämpö. Kuvassa viisitoista on esitetty, että esimerkiksi tiivistymisestä, härmistymisestä ja jäätymisestä vapautuu lämpöä ympäristöön. (Lehtoviita & Laine 2004, 6).



Kuva 14. Lämmön siirtyminen ikkunassa (Siikanen 2011, 78)

3.1.1 Lämmönläpäisykertoimen laskenta

Rakenteen lämmönläpäisykerroin eli U -arvo on laskentasuure, jota käytetään yleisesti rakennusosalalla. U -arvon laskenta on kohtuullisen suoraviivaista ja esitetty kaavassa (2). Kaavasta voidaan todeta, että U -arvo on kokonaislämmönvastuksen käänteisluku.

$$U = 1/R_T \quad (2)$$

, jossa

U = lämmönläpäisykerroin [$W/(m^2 \cdot K)$]

R_T = kokonaislämmönvastus [$m^2 \cdot K / W$]

Kokonaislämmönvastuksen laskemiseen tarvitaan tiedot rakenteen eri rakennekerroksista, niiden paksuuksista ja aineen lämmönjohtavuudesta sekä rakenteen orientaatiosta, kuten kaavasta (3) voidaan todeta. Edellä mainittujen ominaisuuksien perusteella voidaan myös laskea tai valita rakenteen sisä- ja ulkopinnan pintavastukset. (Vinha 2011, 110–111).

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad (3)$$

, jossa

R_1, R_2, \dots, R_n = tasa-aineisten materiaalikerrosten lämmönvastus [$m^2 \cdot K / W$]

R_{si}, R_{se} = rakenteen sisä- ja ulkopinnan pintavastukset [$m^2 \cdot K / W$]

Rakenteen pinnan lähelle muodostuu ohut hitaasti liikkuva ilmakerros, jonka lämmönvastuksesta käytetään nimitystä pintavastus (Vinha 2010, 10; ks. myös Vinha 2011, 110).

Taulukko 6. Rakenteen sisä- ja ulkopinnan pintavastuksien vakioarvot (Vinha 2011, 111 mukailten) ja niiden käänteisluvut.

Sisäpinnan vastus R_{si} , kun lämpö siirtyy			Ulkopinnan vastus R_{se}
Vaakasuuntaan	Ylös	Alas	
0,13 m ² ·K/W	0,10 m ² ·K/W	0,17 m ² ·K/W	0,04 m ² ·K/W
-7,69 W/(m ² ·K)	10 W/(m ² ·K)	-5,88 W/(m ² ·K)	25 W/(m ² ·K)

Vinha (2010, 10–11) toteaa myös, että joissain tilanteissa ulkopinnan pintavastus voi olla jotain muuta kuin taulukossa 3 esitetty vakioarvo tai se voidaan laskea joka tilanteelle erikseen. Esimerkiksi ilmävälin pintavastuksille voidaan käyttää taulukkoarvoa likiarvona tai ne voidaan laskea tarkasti kyseessä olevan pinnan konvektion ja säteilyn lämmönsiirtokertoimien summan käänteisarvona. Maanvastaisessa rakenteessa ei käytetä ulkopinnan vastusta ollenkaan, koska rakenteen pinnassa ei ole erillistä ilmatilaa.

$$R_n = d/\lambda \quad (4)$$

, jossa

d = ilman kyllästyshöyrypitoisuuslämmönläpäisykerroin [m]

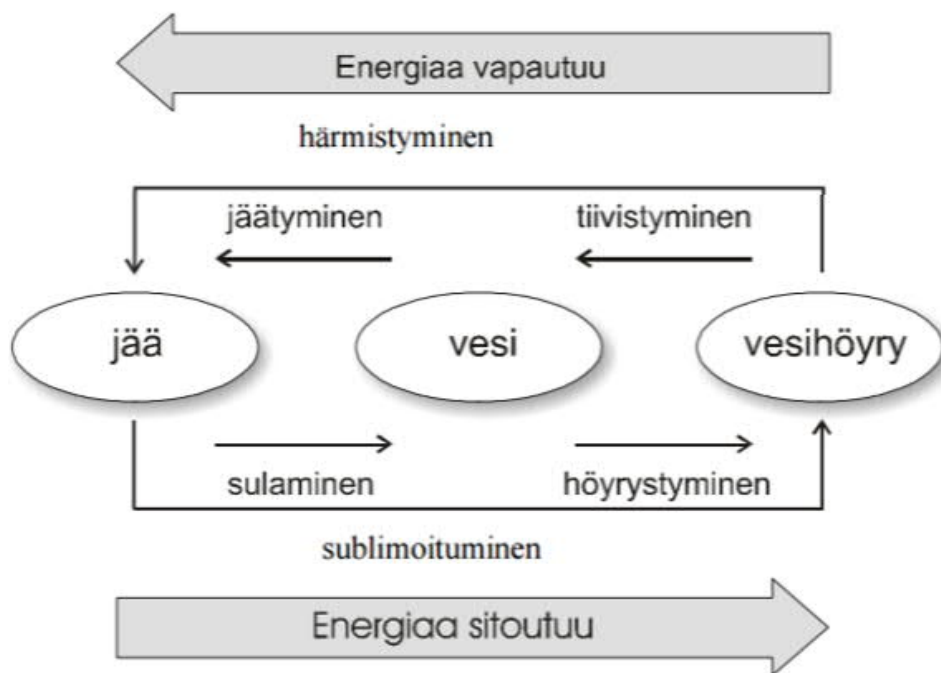
λ = aineen lämmönjohtavuus [W/(m·K)]

U-arvon laskemiseen on olemassa erilaisia lisämenetelmiä ja korjauskerrotoimia. Niitä ei kuitenkaan tarvitse tämän työn rakennetyyppien lämmönläpäisykerrotoimen laskemiseen, koska työssä olevissa rakenteissa kerrokset ovat tasa-aineisia. (Vinha 2011a, 142–160).

3.2 Kosteus ilmassa ja veden olomuodot

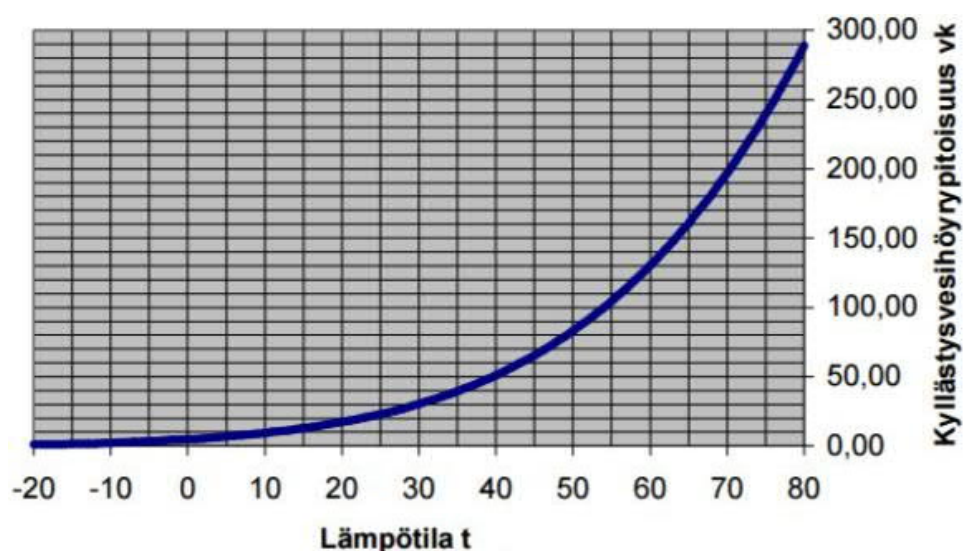
Kosteaa ilmaa koostuu kahdesta kaasusta, kuivasta ilmasta ja vesihöyrystä. Vesihöyry on kuivaa ilmaa kevyempää, joten mitä enemmän vesihöyryä ilma sisältää, sitä kevyempää se on. Normaalioloissa kaikki rakenteet sisältävät kosteutta ja se esiintyy rakenteiden huokosissa olevana vesihöyryinä. Ilma sisältää aina kosteutta vedenpinnan yläpuolella, oli se sitten maan huokosissa olevaa ilmaa, sisä- tai ulkoilmaa. (Björkholtz 2004, 43; Siikanen 2014, 65).

Vedellä on kolme olomuotoa: vesihöyry, vesi ja jää. Kun vesi muuttaa olomuotoaan, energiaa sitoutuu tai vapautuu. Tätä prosessia on esitetty kaavionomaisesti kuvassa viisitoista. Esimerkinomaisesti vesi muuttuu vesihöyryksi, joko kiehumalla tai haihtumalla. Tämä prosessi sitoo energiaa. (Lehtoviita & Laine 2004, 6).



Kuva 15. Veden olomuotoja ja niiden muutoksia (Lehtoviita & Laine 2004, 7 mukailten).

Kosteuden siirtyminen tapahtuu korkeammasta vesihöyryn osapaineesta alempaan, ja kaasuseoksen molekyylit pyrkivät liikkumaan siten, että syntyy tasaisesti jakautunut kaasuseos. Tämä vaikuttaa myös esimerkiksi haihtumisen määrään ja nopeuteen. Toisin sanoen, mitä pienempi on ympäröivän ilman kosteuspitoisuus, sitä suurempi on haihtuvan veden määrä. (Siikanen 2014, 70–71).



Kuva 16. Ilman kyllästysvesihöyrypitoisuus [g/m³] lämpötilan [°C] funktiona (Lehtoviita & Laine 2004, 8).

Vesihöyryn ja ilman seos voi sisältää vain tietyn määrän kosteutta ennen tiivistymistään vedeksi, tätä kutsutaan kyllästysvesihöyrypitoisuudeksi, ν_k (g/m^3). Vesihöyryn maksimimäärä on riippuvainen vallitsevasta lämpötilasta, t ($^{\circ}\text{C}$). Korkeampi lämpötila pystyy sisältämään enemmän vettä. Kylästyskosteuden ja lämpötilan suhde on esitetty kuvassa kuusitoista. (Siikanen 2014, 68–70).

Björkholtz (2004, 43–44) esittelee useita ilman kyllästysvesihöyrypitoisuuden laskemiseen tarkoitettuja likiarvokaavoja eri lämpötila-alueille. Kaava (4) toimii lämpötila-alueella -20°C ... $+80^{\circ}\text{C}$, normaalissa ilmakehän paineessa 101325 Pa, joten se on käyttökelpoinen useimmissa rakennusfysiikan laskelmatarkasteluissa. Kaavan (4) mukaan piirretty kuvaaja ilman kyllästysvesihöyrypitoisuus lämpötilan funktiona, on esitetty kuvassa 16 (Lehtoviita & Laine 2004, 7–8).

$$\nu_k = 4,85 + 3,47 \left(\frac{t}{10}\right) + 0,945 \left(\frac{t}{10}\right)^2 + 0,158 \left(\frac{t}{10}\right)^3 + 0,0281 \left(\frac{t}{10}\right)^4 \quad (4)$$

, jossa

ν_k = ilman kyllästysvesihöyrypitoisuus [g/m^3]

t = ilman lämpötila [$^{\circ}\text{C}$].

Sijoittamalla kaavaan (4) lämpötila saadaan kyseisen lämpötilan kyllästysvesihöyrypitoisuus. Sijoittamalla edellinen tulos kaavaan (5), saadaan suhteellinen kosteusprosentti, kun tiedetään vesihöyrypitoisuus. (Björkholtz, 2004, 43-44; ks. myös Lehtoviita & Laine 2004, 7–8).

$$\text{RH} = \frac{\nu}{\nu_k} 100\% \quad (5)$$

, jossa

ν_k = ilman kyllästysvesihöyrypitoisuus [g/m^3]

ν = ilmassa oleva todellinen vesihöyrypitoisuus [g/m^3].

3.3 Kosteuden sitoutuminen ja siirtyminen aineessa

Keskusteltaessa rakenteiden kosteudesta usein puhutaan oikeastaan rakennusmateriaalin huokosilmatilavuuden suhteellisesta kosteudesta, ei niinkään itse materiaalin kosteusprosentista (Björkholtz 2004, 52).

Kosteusmäärä materiaalissa ilmoitetaan kuitenkin tavallisesti kuivan aineen ja kosteuden massan välisen suhteen avulla. Tämän lukuarvo ilmaistaan yleensä prosentteina kuivapainosta, mutta voidaan ilmaista myös muilla tavoin. (Siikanen 2014, 77).

Kosteuden siirtyminen aineessa tapahtuu aina ulkoisten voimien vaikutuksesta. Kuvassa seitsemäntoista on esitetty termit kosteuden kulkeutumiselle materiaaliin, sen liikkumiselle materiaalissa ja poistumiselle materiaalista – toisin sanoin: absorptio, sorptio ja desorptio. (Siikanen 2014, 77).

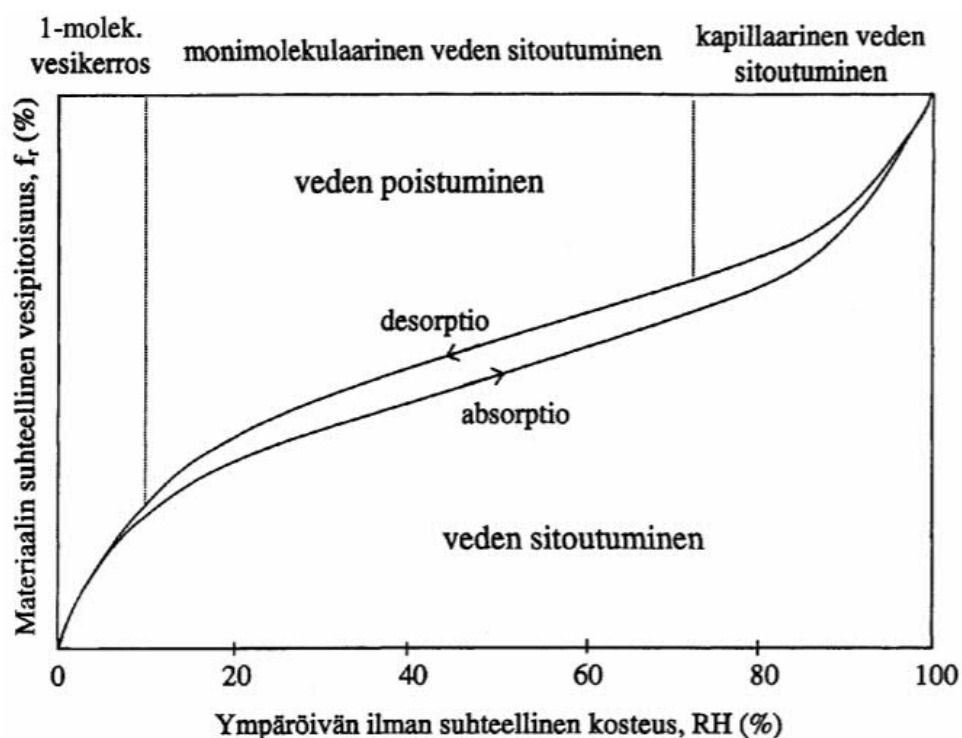


Kuva 17. Kosteuden liikkuminen aineessa (Siikanen 2011, 82; Siikanen 2014, 77 mukailten).

Vinha (2011b, 39) luettelee kosteuden merkittävimmät siirtymismuodot seuraavasti:

- diffuusio (kaasudiffuusio)
- pintadiffuusio
- kapillaarinen siirtyminen
- konvektio
- painovoimainen siirtyminen
- paineenalainen siirtyminen (hydraulinen virtaus).

Painovoimainen siirtyminen materiaalissa tapahtuu vedelle, kun se on nestemäisessä tai kiinteässä olomuodossa ja silloin vesi pyrkii siirtymään alemmaksi. Siirtymiseen pinoilla vaikuttaa myös esimerkiksi veden pintajännitys, joka vastustaa painovoimaa ja siten pidentää aikaa vesialtistumiselle rakenteen pinnassa. (RIL 2011,71).



Kuva 18. Tasapainokosteuskäyrän periaate (Lehtoviita & Laine 2004, 37).

Painovoima vaikuttaa myös veden paineenalaiseen siirtymiseen aiheuttamalla painetta vesikerroksen alempiin osiin. Tästä esimerkkinä ovat esimerkiksi uima-altaiden seinät ja pohjavedenalainen rakentaminen. (RIL 2011,71).

Kuvassa kahdeksantoista on esitetty tasapainokosteuskäyrä eli sorptio-käyrä. Käyrällä kuvataan materiaalin hygroskooppisuutta. Se on ilmiö, jossa materiaalin sisäisten huokosten ilman suhteellinen kosteus pyrkii asettumaan samaan arvoon ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden kanssa. Kun aine on saavuttanut tämän tasapainotilan, sitä kutsutaan hygroskooppiseksi tasapainokosteudeksi ja sen ylärajana on ilman suhteellisen kosteuden arvo 98 %. Tämä on havaittavissa myös kuvassa yhdeksäntoista. (Björkholtz 2004, 59–60; Siikanen 2014, 77).

Materiaalien hygroskooppisuus vaihtelee laajasti, ja hygroskooppisen tasapainokosteuden absoluuttinen suuruus on erilainen eri materiaaleilla. Tämän lisäksi se on riippuvainen lämpötilasta sekä siitä, onko kyseessä kuivuminen vai kostuminen. Puupohjaisilla aineilla hygroskooppisuus on suurin ja mm. mineraalivilloilla hyvin pieni. (Björkholtz 2004, 60; Siikanen 2014, 77).

3.3.1 Diffuusio

Diffuusion seurauksena kaasuseoksien yksittäisten kaasujen pitoisuuserot tai osapaine-erot pyrkivät tasapainotilaan. Kaasumolekyylit liikkuvat korkeammasta pitoisuudesta matalampaan. (Vinha 2011b, 47; Siikanen 2014, 70–71).

Eri materiaalien vesihöyrynläpäisevyyksiä voidaan vertailla laaduttomalla diffuusiovastuskertoimella, μ . Diffuusiovastuskerroin voidaan laskea mm. kaavalla (6). (Vinha 2011b, 47).

$$\mu = \frac{D_a}{\delta_v} \quad (6)$$

, jossa

D_a = ilman vesihöyrynläpäisevyys [m^2/s]

δ_v = ilman vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmaistuna [$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$].

Muita vesihöyryvastuksen muunnoskaavoja ja niiden suhteita toisiinsa on esitetty liitteissä kuusi, seitsemän ja kahdeksan.

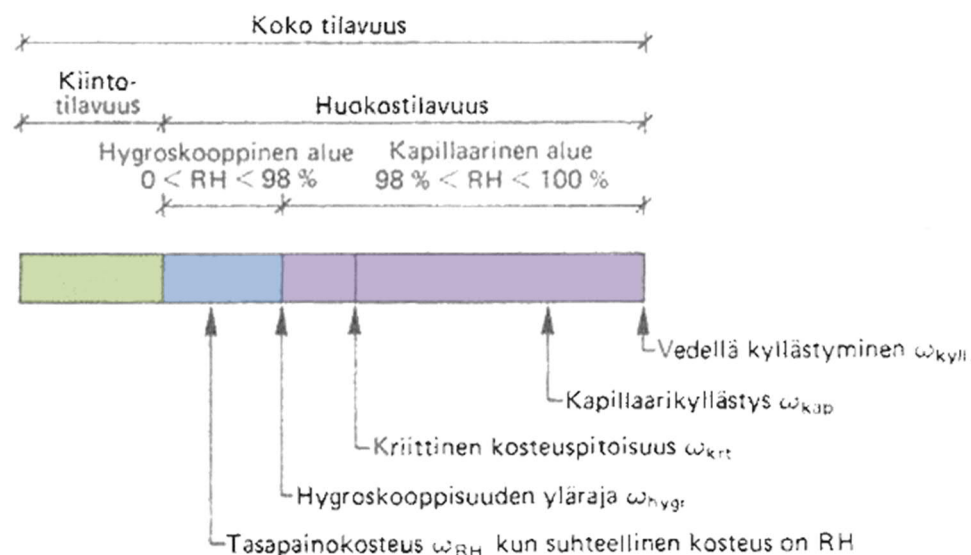
3.3.2 Kapillaari-imu

Kapillaarisuutta voidaan kuvata ohuen pyöreän putken avulla, joka asetetaan toisesta päästään veteen. Tällöin vesi nousee putken reunoja ylöspäin ja veden pinta kaareutuu putken sisällä. Kaarevan veden pintaan syntyy

pintajännitys, joka luo pinnan ja ilman välille paine-eron, jota kutsutaan huokosalipaineeksi. (Vinha 2011b, 83).

Huokoisessa aineessa nestemäinen vesi liikkuu kapillaarisesti, tällöin huokosalipaineen paikalliset erot aiheuttavat kapillaarivirtauksen. Esimerkiksi maaperässä vesi pyrkii nousemaan pohjaveden yläpuolelle kapillaarivoimien vaikutuksesta. Vedennousun suuruus em. tapauksessa riippuu maalajin karkeudesta. (Siikanen 2014, 68).

Kosteus siirtyy kapillaarisesti materiaalin koskettaessa vapaaseen veteen tai toiseen kapillaarisella kosteusalueella olevaan materiaaliin. Veden kapillaarinen siirtyminen on mahdollista mihin tahansa suuntaan. Kapillaarikosteuden siirtymistä rakenteisiin on pyritty estämään mm. kermillä, muovilla, bitumisivelyillä, tiiviillä pintakerroksella ja kapillaarikatkokerroksella (Siikanen 2014, 68). Maanvastaisissa rakenteissa kapillaarisen siirtymisen katkaiseva kerros on erityisen tärkeässä asemassa (RIL 2011, 71–72).



Kuva 19. Huokoisen materiaalin huokosjakauma ja kastuminen (Björkholtz 2004, 53 mukailten).

Kun kosteuspitoisuus materiaalissa ylittää kapillaarikyllästyspitoisuuden, ω_{kap} se siirtyy ylikyllästysalueelle. Silloin materiaalin suhteellinen kosteus on aina 100 % ja kapillaarihuokokset ovat täysin täyttyneitä. Materiaalissa voi kuitenkin olla vielä tämänkin jälkeen huokosia, jotka ovat liian suuria kapillaariselle nousulle, kyseiset huokokset voivat silloin täyttyä diffuusion avulla. Materiaalin tilaa, jossa kaikki huokokset ovat veden täyttämiä, kutsutaan maksimikosteuspitoisuudeksi tai vedellä kyllästymiseksi, ω_{kyll} . (Heiskanen 2015, 8–9).

3.3.3 Kosteuskonvektio

Kun vesihöyry siirtyy ilmavirtauksen mukana, sitä kutsutaan konvektioksi. Ilmavirtausten syntyyn vaikuttavat ilmanpaine-erot, joita aiheuttavat mm. tuuli, lämpötilaerot sekä ilmanvaihtojärjestelmät. (Björkholtz 2004, 57).

Kosteusvaikutuksiltaan Björkholtz (2004, 58) jakaa konvektiovirrat seuraavasti:

- ilmaa virtaa sisältä ulos, jäähtyy ja samalla kosteus voi tiivistyä tai kerääntyä rakenteeseen
- ilma virtaa ulkoa sisään, lämpenee ja samalla virtaus kuivattaa rakennetta ilman kosteussitomiskyvyn kasvaessa.

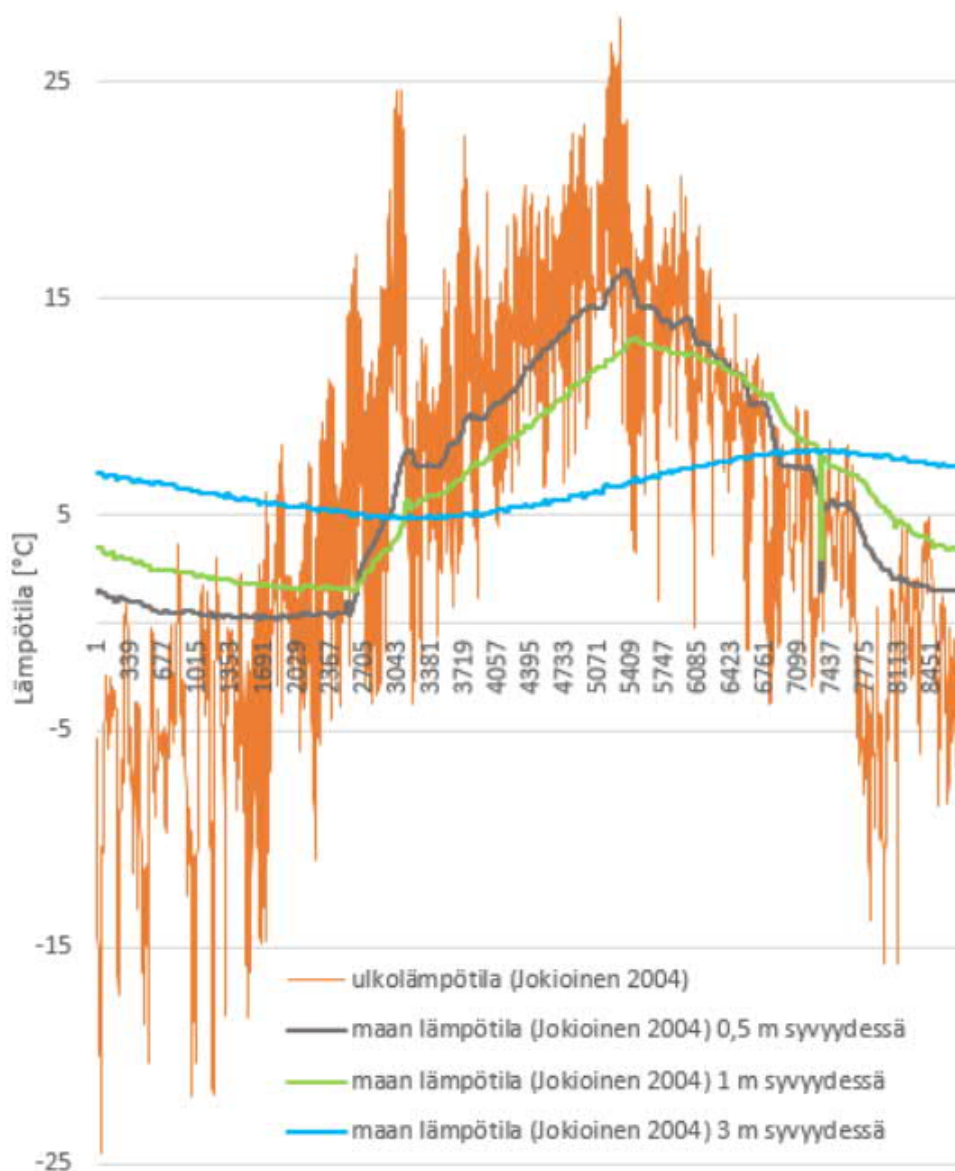
Rakennuksessa konvektio ilmentyy rakojen, reikien ja huokoisten materiaalien läpi virtaavana ilmana. Huokoisten materiaalien läpäisevä konvektio on käytännössä merkityksetön verrattuna reikien ja rakojen kautta tapahtuvaan konvektioon. (Björkholtz 2004, 58; Siikanen 2014, 71).

3.4 Maanvastaiset rakenteet

Maanvastaisten rakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta eroaa ulkoilmaa vasten olevista rakenteista lämpötilan vaihtelun, kosteusolosuhteiden ja rakenteen perustoimintaperiaatteen osalta. (Leivo & Rantala 2002b, 5).

Rakenteen sisäpinnan olosuhteet mukailevat sisäilman olosuhteita, jotka riippuvat ulkoilman kosteusolosuhteista ja osin ilmanvaihdon toiminnasta sekä sisäilman lämpötilasta. Sisäilman normaalina lämpötilana voidaan pitää 19–22 celsiusastetta ja suhteellisen kosteuden arvoa välillä 25–60 %. (Leivo & Rantala 2002b, 9).

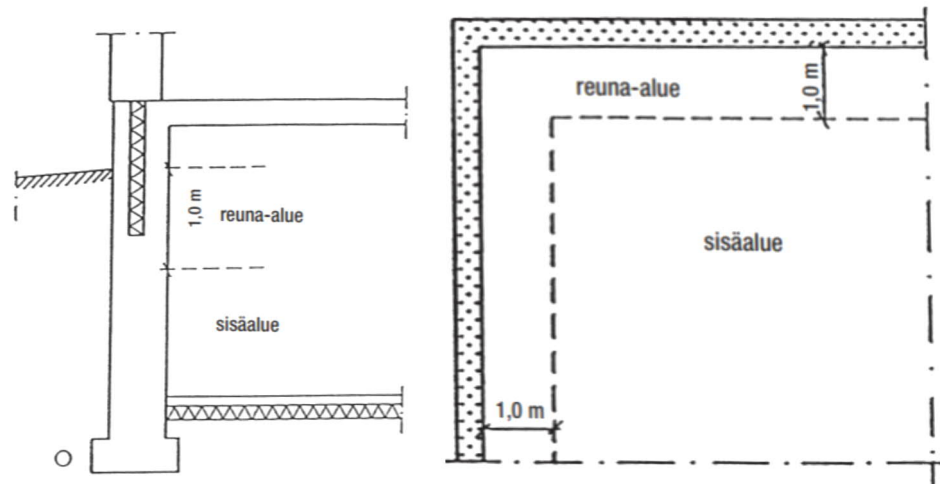
Rakenteen ulkopinnoilla olosuhteet ovat lähempänä vakioarvoja mitä syvemmälle maan pinnan alle mennään (Leivo & Rantala 2002b, 8). Kuvassa kaksikymmentä on esitetty mitattuja maan lämpötilan arvoja vuoden ajalta tarkasteltuna ja vertailtuna ulkoilman lämpötiloihin saman aikakauden sisällä. Mittauspaikkana ja -vuotena on Jokioinen 2004. Kuvaajasta voidaan myös todeta, että mentäessä syvemmälle maan alle lämpötilan vaihtelu pienenee. Maan lämpötila lähenee vuosikeskiarvon lämpötilaa 4,5...12 metrin syvyydellä (Laukkarinen, Heiskanen & Vinha 2017, 72).



Kuva 20. Ulkoilman ja maaperän lämpötiloja celsiusasteina eri syvyyksiltä mitattuna, vuoden ajan, tunnin aika-askeleella Jokioisilla 2004. (Ilmatieteenlaitos, 2013; Jylhä 2017).

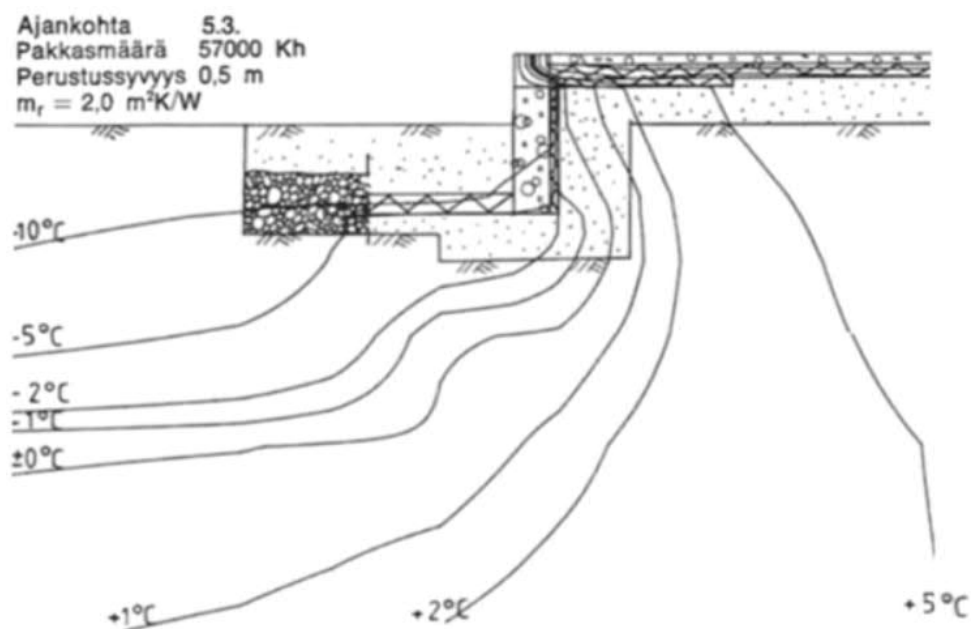
Leivo ja Rantala (2002b, 23–24) toteavat myös maanvastaisten rakenteiden maatyön lämpötilaan vaikuttavan ulkoilman lisäksi myös rakennuksen sisälämpötila sekä rakenteen lämmönvastus. Kun täyttömaiden suhteellinen kosteus on aina lähes 100 %, lämpötila vaikuttaa suoraan maapohjan absoluuttisen kosteuden määrään – mitä lämpimämpi maapohja on, sitä enemmän kosteutta siihen on sitoutunut.

Normaaleissa olosuhteissa alapohjarakenteiden kosteuspitoisuus riippuu pääasiassa ympäristön suhteellisesta kosteudesta. Rakenteisiin on kuitenkin voinut jäädä kosteutta tai kulkeutua ulkopuolista kosteutta, jolloin rakenteen tasapainokosteudessa on poikkeamia. Maanvastaiset rakenteet ovat lähes aina kosketuksissa maaperän kautta pohjaveteen, jolloin kapillaarinen kosteuden nousu on mahdollista, ellei sitä estetä erillisen kapillaarikatkokerroksen avulla. (Leivo & Rantala 2002a, 24).



Kuva 21. Kellarin seinän ja maanvastaisen laatan reuna- ja sisäalueiden määrittely RakMK C4, 2003 mukaan (Ympäristöministeriö 2002, 18–19).

Ympäristöministeriön (2002, 18–19) rakentamismääräyskokoelman osassa C4 ja kuvassa kaksikymmentäyksi on esitetty kellarillisen rakenteen ja maanvastaisen laatan laskennalliset lämpötilakentät, joiden maakerroksille on määritelty omat lämmönvastuksensa. Ilmiö on esitetty myös kuvassa kaksikymmentäkaksi, jossa on esitetty matalaperustuksen lämpötilakenttä. Kuvassa on nähtävissä myös reuna-alueen paksumpi lämmöneristeen määrä kuin muun alapohjan alueella.



Kuva 22. Kylmäsillan vaikutus matalaperustuksen lämpötilakenttään (Kivikoski 1989, 38 mukailten).

3.5 Homeindeksi

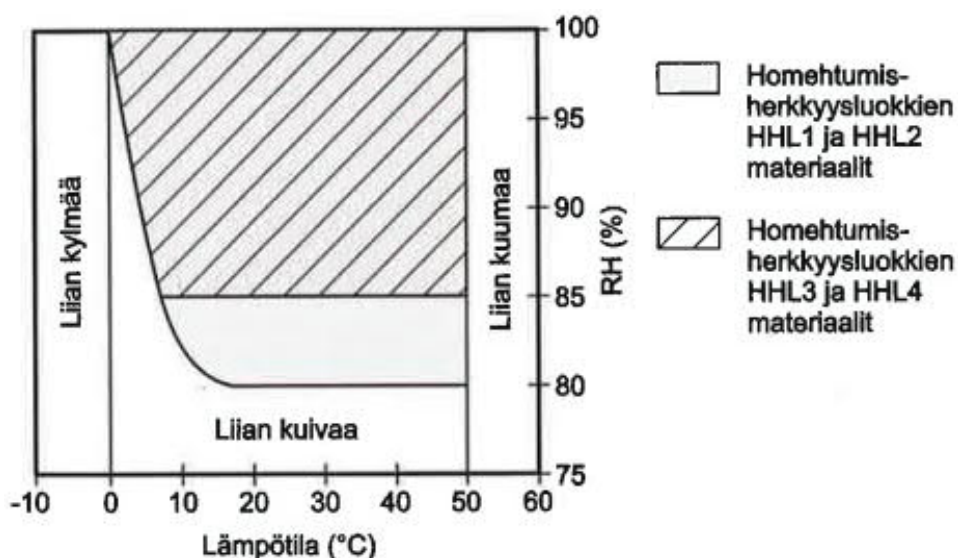
Rakennusfysikaalisten simulointien yhdeksi analysointimenetelmäksi ovat VTT ja TTY kehittäneet yhdessä Suomalaisen homemallin, joka tarkastelee homeen kasvua laskennallisesti. Malli perustuu aiemmin puumateriaaleille kehitettyyn VTT:n homemalliin. Suomalaisessa homemallissa homeen kasvua arvioidaan ajan funktiona matemaattisilla kaavoilla, jotka perustuvat kokeisiin eri rakennusmateriaalien pinnoilla muuttuvissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa. (Tampereen yliopisto 2019a; RIL 2014, 60–64).

Mallin laskennan tuloksena saadaan tarkastelupisteelle vertailusuure homeindeksi M , jonka vaihteluväli on 0–6. Homeindeksin mukaiset luokitusperusteet on esitetty taulukossa 2. Taulukosta selviää, että vasta homeindeksin arvolla 3 homeikasvu on silmin havaittavissa, kuitenkin homeindeksin hyväksyttävänä raja-arvona pidetään homeindeksiä $M < 1$, jolloin rakenteessa ei ole vielä tapahtunut homeen kasvua. (Tampereen yliopisto 2019a; RIL 2014, 60–64).

Taulukko 7. Homeindeksin luokitustasot (RIL 2014, 60 mukaillen)

Homeindeksi (M)	Luokitusperusteet
0	Ei kasvua, pinta puhdas
1	Mikroskoopilla havaittava kasvu, paikoin alkavaa kasvua, muutama rihma
2	Mikroskoopilla havaittava kasvu, useita rihmastopesäkkeitä muodostunut
3	Silmin havaittava kasvu, rihmaston peitto alle 10 % pinta-alasta (alkavaa itiöiden muodostusta) TAI mikroskoopilla havaittava kasvu, peitto yli 50 % pinta-alasta
4	Silmin havaittava kasvu, rihmaston peitto noin 10-50 % pinta-alasta TAI mikroskoopilla havaittava kasvu, peitto yli 50 % pinta-alasta
5	Silmin havaittava kasvu, paikoin runsas tai rihmaston peitto yli 50 % pinta-alasta
6	Erittäin runsas kasvu, rihmaston peitto lähes 100 %

Homeindeksi lasketaan tunnin välein määritettyjen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvojen perusteella. Mallissa otetaan huomioon myös homeen taantuminen liian kuivissa tai kylmissä olosuhteissa, jolloin homeindeksin arvo pienenee. Tätä homeen kasvun ja taantumisen olosuhteita on kuvattu eri homehtumisherkkyysluokkien materiaaleille kuvassa kaksikymmentäkolme, jossa on määritelty homeen kasvuedellytykset lämpötilan ja suhteellisen kosteuden suhteen.



Kuva 23. Homeen kasvun kannalta suotuisat kosteus- ja lämpötilaolosuhteet eri homehtumisherkkyyssuokissa. (RIL 2014, 61).

On kuitenkin huomioitava, että homeindeksi ei kuvaa erilaisten homelajien terveydelle vaarallisuutta vaan ylipäänsä homeen kokonaiskasvua eri materiaalien pinoilla. (Tampereen yliopisto 2019a; RIL 2014, 60–64).

Suomalaisen homemallin Excel-laskentapohja on avoimesti saatavissa Tampereen yliopiston verkkosivuilla. Laskentapohjaan syötetään lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot tunnin välein, ja pohja laskee automaattisesti homeindeksin kyseisessä pisteessä. Tämän työn yhteydessä jatkokehitettiin kyseisestä laskentapohjasta raporttipohjan liite.

Taulukko 8. Rakennusmateriaalien luokittelu eri homehtumisherkkyyssuokkiin (RIL 2014, 61 mukailten)

Homehtumisherkkyyssuokka	Rakennusmateriaali
HHL 1 Hyvin herkästi homehtuva	Karkeasahattu mänty ja kuusi, mitallistettu mänty
HHL 2 Herkästi homehtuva	Höylätty kuusi, paperipohjaiset tuotteet ja kalvot, puupohjaiset levyt, kipsilevy
HHL 3 Kohtalaisen kestävä	Mineraalivilla, muovipohjaiset materiaalit, tiilet, kevytsorabetoni, karbonatisoitu betoni
HHL 4 Kestävä	Lasi ja metallit, alkalinen uusi betoni, tehokkaita homesuoja-aineita sisältävät materiaalit

3.6 Rakennusfysikaalinen mallinnus

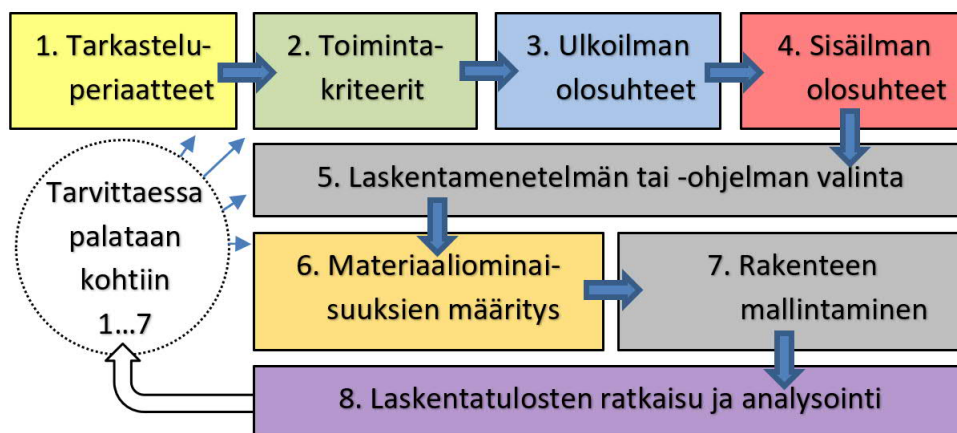
Kun vertaillaan lujuusteknisiä ja rakennusfysikaalisia mitoitustarkasteluita, kosteus- ja lämpötekniset mitoitustarkastelut ovat usein monisyisempiä ja

hankalampia toteuttaa useiden seikkojen vuoksi. On muun muassa tunnettava ja osattava soveltaa:

- lämpö- ja kosteusfysiikan teoriaa
- rakenteiden toimintakriteereitä ja vaurioitumismekanismeja
- rakennusmateriaalien rakennusfysikaalisia ominaisuuksia rasiituksia ääriolosuhteissa. (Vinha ym. 2013, 42; Tampereen yliopisto 2019b; RIL 2014, 54).

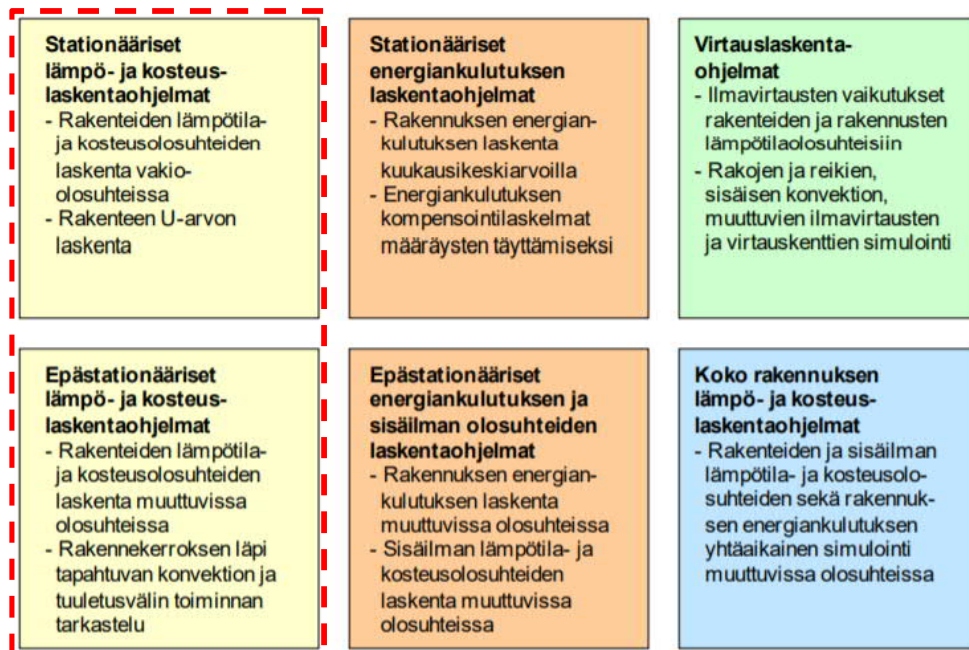
Rakennusfysikaalista suunnittelua voidaan tehdä myös ilman tarkempia laskentatarkasteluita, mutta laskennallisten tarkasteluiden tarve on kasvanut esimerkiksi lämmöneristysmääräysten päivittämisen yhteydessä, kun eristemäärät ovat lisääntyneet ja siten rakenteiden kosteusolosuhteet ovat voineet muuttua. Korjausrakentamisen ja rakennussuojelun vaatimukset saattavat myös tuoda lisähaastetta rakennusfysikaaliseen suunnitteluun, kun vakioratkaisuja ei voida käyttää. Laskennalla voidaan myös optimoida rakennetta entistä paremmin. (RIL 2014, 54).

Kuvassa 24 on esitetty rakennusfysikaalisen ongelmanratkaisun iteratiivista prosessia. Rakennusfysiikassa yleensä mallinnetaan ideaalirakenteita, minkä vuoksi laskentatuloksien ymmärtäminen on tärkeää, ja laskennassa sekä arvioinnissa on hyvä käyttää useampia menetelmiä. (RIL 2014, 56–58).



Kuva 24. Rakennusfysikaalisen iteratiivisen laskentatarkastelun prosessi-kaavio (RIL 2014, 55; Vinha ym. 2013, 43 mukaillen).

Edellä mainituilla perusteilla voidaan arvioida rakenteen rakennusfysikaalista toimivuutta ja vaurioitumisen riskialttiutta. Yleisesti käytettyjä menetelmiä laskentaan on esitetty kuvassa kaksikymmentäviisi. Rakennusfysikaaliset laskentatarkastelut voidaan jakaa stationääriseen laskentatapaan, eli tietyn ajan hetkeen sidottuun tilanteeseen vakioarvoilla, ja epästationääriseen laskentatapaan, jossa olosuhteet muuttuvat dynaamisesti. (RIL 2014, 73; Vinha ym. 2013,).



Kuva 25. Laskentaohjelmien jako eri ryhmiin niiden toiminnan perusteella (Vinha ym. 2013, 51).

Tässä työssä laskentamenetelminä käytetään kuvassa kaksikymmentäviisi punaisella katkoviivalla rajattua aluetta. Epästationäärisissä ohjelmissa voidaan käsitellä 1D-, 2D- tai 3D-rakenteita. (RIL 2014, 57).

3.6.1 WUFI 1D- ja 2D rakennusfysikaalinen mallinnus

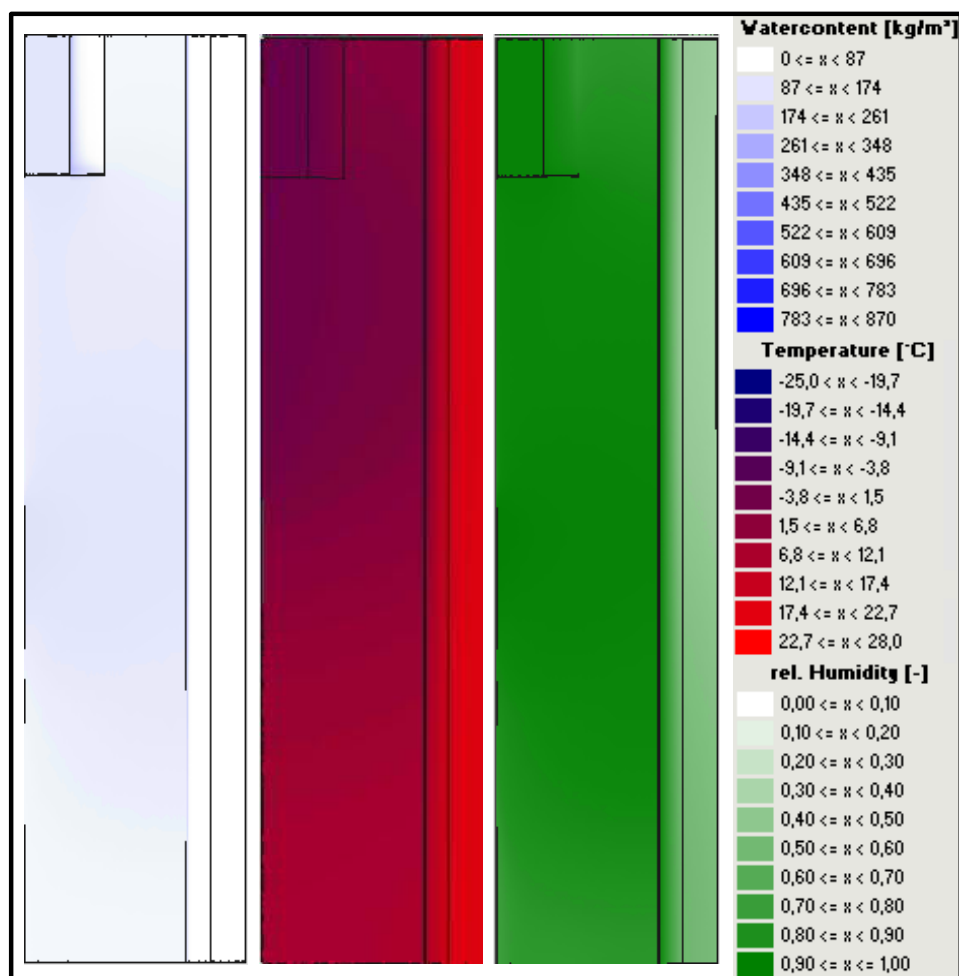
Saksalainen Fraunhofer institut für bauphysik on kehittänyt kosteuden- ja lämmönsiirron simulointiohjelmaa, joita hyödynnetään erilaisissa rakennusfysikaalisissa analyyseissä. WUFI (Wärme Und Feuchte Instationär = Transient Heat and Moisture) simuloi rakenteen käyttäytymistä epästationäärisessä tilassa, jossa rakenteen ympärivät olosuhteet muuttuvat jatkuvasti. (WUFI, 2017).

Rakenteen kosteuskäyttäytyminen on aina yhteydessä myös rakenteen lämpökäyttäytymiseen, joten puhuttaessa kosteussimuloinnista tarkoitetaan aina yhdistettyä kosteus- ja lämpösimulointia. Lämmönsiirtomekanismeista WUFI ottaa huomioon lämmön johtumisen, lyhytaaltoisen aurinгон säteilyn, pitkäaaltoisen säteilyn aiheuttaman jäähtymisen sekä veden faasimuutoksista johtuvan lämmönsiirtymisen. Kosteudensiirtomuodoista WUFI ymmärtää vesihöyryn diffuusion, liuoksen diffuusion, kapillaarisen siirtymisen sekä pintadiffuusion. (WUFI, 2009).

Epästationäärisellä lämpö- ja kosteussimuloinnilla voidaan tutkia rakenteiden kosteuskäyttäytymistä, sekä arvioida kuivumisaikoja, homehtumisriskiä ja kosteuden kertymistä rakenteisiin (RIL-255-1-2014, 76–77; ks. myös WUFI, 2009 ja WUFI, 2017).

WUFI- ohjelmista on useampi versio, joilla jokaisella on omat hyvät ominaisuutensa. Tässä käsitellään ohjelman versioita PRO (yksidimensionaalinen laskenta) ja 2D.

Ilmaraon ilman vaihtuvuus, kosteuslähteet ja kuivauskapasiteetti määritellään WUFI:ssa manuaalisesti, koska ohjelma ei sisällä virtausteknistä laskentaa. Ilmarakoon määritellään mahdollinen korvausilman lähde, 2D-ohjelmassa sen voi määrittää erikseen ja 1D-ohjelmassa korvausilman lähde voi ainoastaan olla jompikumpi kyseisen simuloinnin valituista sisä- tai ulkoilmastoista. Tässä työssä ei kuitenkaan määritellä ilmaraoille tuuletuvuutta tai kuivatuskapasiteettia.

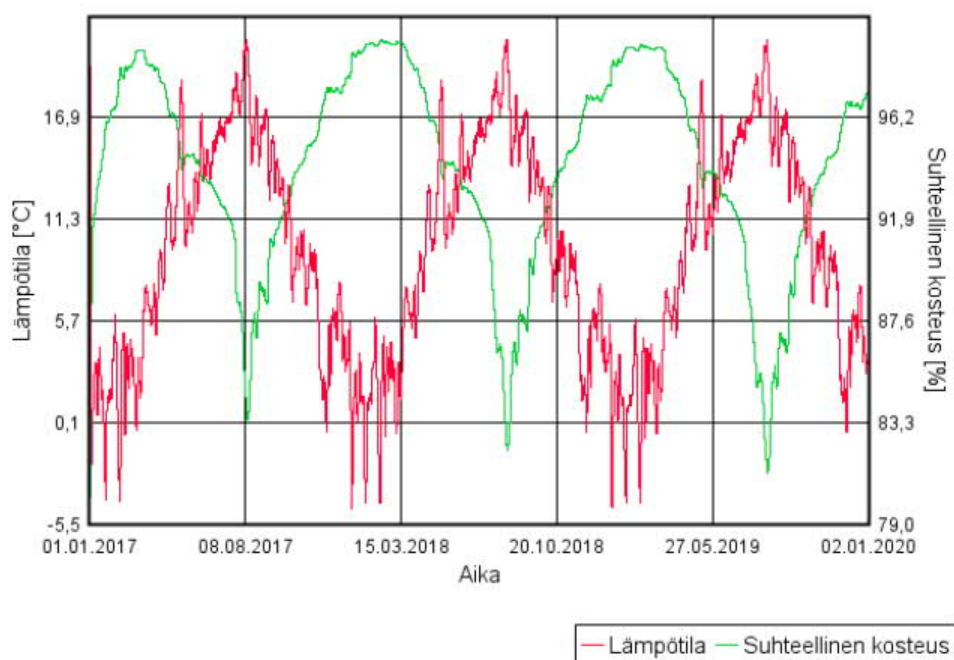


Kuva 26. Tapauksen B mallirakenteen vesimäärä [kg/m³], lämpötilakenttä [°C] ja suhteellinen kosteus [-] kolmen vuoden simuloinnin loppuhetkellä.

Valmiin 2D-simuloinnin tuloksia voi tarkastella WUFI2DMotion tai WUFI Graph (1D) ohjelmien avulla. WUFI2DMotion ohjelmalla voi tarkastella koko rakenteeseen kertyvää kosteutta tai lämpötilojen muuttumista simulaation edetessä. Vaihtoehtoisesti voi määritellä ajan hetken, jota haluaa tarkastella.

Kuvassa kaksikymmentäkuusi on esitetty tapauksen B simuloinnin loppuhetken lämpö- ja kosteusolosuhteet mallinnetun rakenteen eri alueilla WUFI2DMotion-ohjelmassa. Tämä ohjelman toiminto on käyttökelpoinen hankalien rakenteiden kosteuskäyttäytymisen selvittämisen kannalta. Koska koko mallinnetun rakenteen näkyessä voidaan havaita riskipaikat, minne kosteus kerääntyy, ja sen perusteella määritellä rakenteelle tarkastelupisteet.

WUFI Graph ohjelmalla pystyy tarkastelemaan pistettä tai alueita valitsemalla laskentasuorituksen, jolloin ohjelma piirtää niistä kuvaajan. Kuvassa kaksikymmentäseitsemän on esitetty erään pisteen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kuvaajat simuloitulle ajalle. Kuvaajia voi saada myös mm. pisteen kokonaiskosteuskertymästä ja vesihöyrynsapaineesta.



Kuva 27. Erään WUFI tarkastelupisteen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kuvaaja kolmen vuoden simuloinnista.

Molemmat ohjelmat sisältävät laajan materiaalikirjaston, joka perustuu mitattuun materiaalitietoon. Tätä materiaalikirjastoa on hyödynnetty laajasti tämän työn simuloinneissa.

3.6.2 Rakennusfysikaaliset testivuodet

Tampereen teknillinen yliopisto on luonut FRAME-projektin yhteydessä ilmatieteenlaitoksen kanssa yhteistyössä Suomen ilmastoon rakennusfysikaaliset testivuodet. Aikaisemmin rakennusfysikaalisiin laskentatarkasteluihin on käytetty mm. energiakulutuksen määritettyä testivuotta, koska kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittisiä vuosia ei ole määritetty. (Vinha ym. 2013, 44).

FRAME-projektin lopputuloksena määritettiin kaksi erilaista testivuotta nyky- ja tulevaisuuden ilmastoissa. Paikkakunnat Jokioinen ja Vantaa valikoituivat seuraavin perustein: homeen kasvu ja kosteuden kondensoituminen rakenteeseen. Taulukossa yhdeksän on esitetty (Vinha ym. 2013, 44).

Taulukko 9. Rakennusfysikaalisten testivuosien ohjeelliset käyttökohteet (RIL 2014, 68, mukailten)

Rakennetyypit	Testivuosi		
	Nykyilmasto	2050 ilmasto	2100 ilmasto
Rakenteet, joissa ulkoilman suhteellinen kosteus vaikuttaa niiden sisäosan kosteustekniseen toimintaan. Esimerkkirakenteita: - puu- ja metalliverhotut ulkoseinät - betonisandwich-rakenteet ¹ - harkkorakenteet ¹ - sisäpuolelta eristetyt massiivirakenteet - yläpohjat, joissa on vesikate - ryömintätillaiset alapohjat	<i>Jokioinen 2004</i> ilmansuunta seinärakennetarkasteluissa: <i>pohjoinen</i> ²	<i>Jokioinen 2050</i> ilmansuunta seinärakennetarkasteluissa: <i>pohjoinen</i> ²	<i>Jokioinen 2100</i> ilmansuunta seinärakennetarkasteluissa: <i>pohjoinen</i> ²
Rakenteet, joissa sade ja ulkoilman suhteellinen kosteus vaikuttavat niiden sisäosan kosteustekniseen toimintaan Esimerkkirakenteita: - tiiliverhotut ulkoseinät - eristerapatut ulkoseinät - betonisandwich-rakenteet ¹ - harkkorakenteet ¹ - käännettyt katot	<i>Vantaa 2007</i> ilmansuunta seinärakennetarkasteluissa: <i>etelä</i>	<i>Vantaa 2050</i> ilmansuunta seinärakennetarkasteluissa: <i>etelä</i>	<i>Vantaa 2100</i> ilmansuunta seinärakennetarkasteluissa: <i>etelä</i>

¹ Rakenteesta riippuen kumpi tahansa testivuosista voi olla kriittisempi. Rakenteen toiminta on syytä tarkistaa kummallakin testivuodella.

² Rakenteen ulkopinnan kosteusteknistä toimintaa tarkasteltaessa kriittisin ilmansuunta voi olla myös joku muu kuin pohjoinen (ks. luku 4.5.3).

Rakennusfysikaaliset testivuodet on valittu niiden kriittisyyden perusteella. 30 vuoden ilmastodatan perusteella vähintään 90 % vuosista on vähemmän kriittisiä kuin testivuodet. Keskimäärin kriittisiä vuosia esiintyy vain kahtena vuotena peräkkäin, joten tässä työssä simulointeihin valittu kolmen vuoden ajanjakso tuo lisävarmuutta laskelmiin, koska kolmas vuosi on yleensä rakenteen toiminnan kannalta suotuisampi. (Vinha ym. 2013, 21, 149).

3.6.3 Sisäilman olosuhteet

Kuivikko (2018) kuvaa sisäilmaston keskimääräisiä ominaisuuksia seuraavilla suureilla:

- lämpötilan vaihteluväli 18–24 celsiusastetta
- suhteellisen ilmankosteuden vaihteluväli 40–80 prosenttia
- ilman vaihtuvuus kerran tunnissa tai kahdessa
- ilman nopeuden vaihteluväli 0,1–0,3 m/s.

Tutkimuksessa käytettävässä rakennusfysikaalisessa mallinnusohjelmassa määritellään ainoastaan lämpötila ja suhteellinen kosteus sisäilman osalta. Toisin sanoen ilman vaihtuvuutta tai nopeutta ei määritellä sisäilmaan.

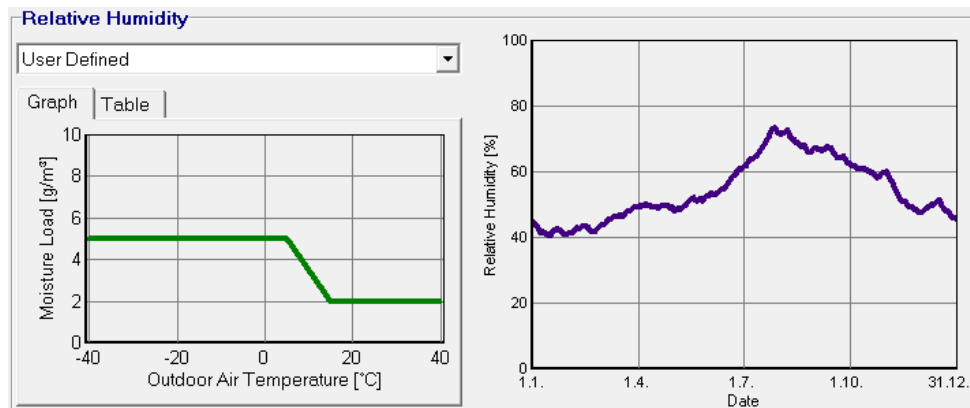
Sisäilman kosteuspitoisuus määritettiin kaikissa simulointitilanteissa käytettävän ulkoilmaston lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mukaan siten, että sisäilmaan lisättiin myös luokan kaksi (2) mukainen kosteuslisä. (RIL 2014, 70–72).

Taulukko 10. Sisäilman kosteuslisän perusteella määritettyihin kosteusluokkiin kuuluvat rakennustyypit (RIL 2012, 24, mukaillen).

Kosteusluokka	Kosteuslisän mitoitussarvo talvella ($T \leq 5 \text{ °C}$)	Rakennustyyppi
1	$> 5 \text{ g/m}^3$ (arvioidaan kohdekohtaisesti)	Kylpylät, uimahallit, laitoskeittiöt, pesulat, panimot, kirjapainot, kasvihuoneet, kostutetut tilat, ratsastusmaneesit, maatalouden tuotantorakennukset, eläinsuojat ja teollisuuden kosteusrasitetut tilat (joskus myös jäähallit ja jäädytetyt liikuntatilat, kylmä- ja pakkashuoneet).
2	5 g/m^3	Asuinrakennukset, toimisto- ja liikerakennukset, hotellit ja majoitusrakennukset, ravintolat, kokoontumis- ja juhlatilat, opetusrakennukset ja päiväkodit, sairaalat ja hoitolaitokset, museot, liikuntahallit ja -tilat, jäähallit ja jäädytetyt liikuntatilat, kylmä- ja pakkashuoneet, talviasuttavat vapaaajan asunnot.
3	3 g/m^3	Vapaa-ajan asunnot, puolilämpimät tai kylmillään olevat rakennukset, varastot ja säilytystilat, ajoneuvosuojat, tekniset tilat, väliaikaiset ja siirrettävät rakennukset.

Kosteuslisä on valittu taulukon kymmenen perusteella kosteusluokkaan kaksi, koska suurin osa normaali toimintoja sisältävistä rakennuksista kuuluu siihen.

Kuvassa kaksikymmentäkahdeksan on suora näkymä Wufi2D ohjelmasta ja sisäilman suhteellisesta kosteudesta (violetti kuvaaja), kun sinne on lisätty luokan kaksi mukainen kosteuslisä (vihreä kuvaaja). Kosteuslisä on 5 g/m^3 vaihteluvälillä $-40 \dots +5 \text{ °C}$ ja 2 g/m^3 $+15 \dots +40 \text{ °C}$, pienentyen lineaarisesti lämpötilojen $+5 \dots +15 \text{ °C}$ välillä.



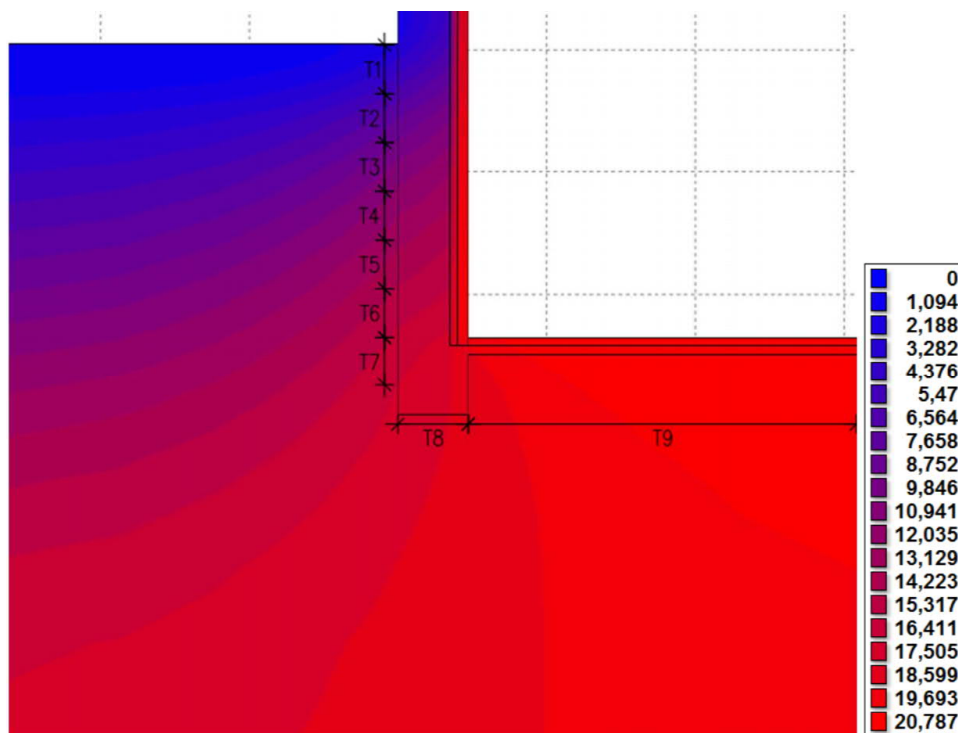
Kuva 28. Kosteusluokan kaksi mukainen sisäilman kosteuslisäkuvaaja (vas.) ja vuoden sisäilman suhteellinen kosteuskuvaaja 21 °C va-kiolämpötilassa Jokioisilla 2004, kun siihen on lisätty em. kos-teuslisä.

Kellaritiloissa lämpötilat voivat usein olla myös alle 20 °C, mutta tässä tut-kimuksessa on päätetty käyttää sisäilman lämpötilana 21 celsiusastetta. Tämä johtuu siitä oletuksesta, että kun tehdään kapselointikorjaus tiettyyn tilaan, se ei ole enää sekundäärinen käyttötila.

3.6.4 Maanvastaisen rakenteen rakennusfysikaaliset simulointiolosuhteet

Maanvastaisten rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen simulointiin ei ole vielä kehitetty vakiintuneita, vastaavia simulointiolosuhteita, kuin raken-nusfysikaaliset testivuodet ovat muille ulkovaipparakenteille. Vaikkakin ra-kennusfysikaalisten testivuosien avulla pystytään laskea maaperän kos-teus- ja lämpöolosuhteet mallintamalla, kuten TTY:n Combi-hankkeeseen liittyvässä Roosa Heiskanen diplomityössä on tehty. (2015, 34–37).

Kyseisessä diplomityössä mallinnus tehtiin siten, että maata mallinnettiin tarkasteltavan rakenteen sivulle ja alapuolelle kolmen metrin maakerros. Simulointia yritettiin suorittaa ensin yhdistettynä lämpö- ja kosteustekni-senä laskentana, mutta huolimatta tehokkaasta moniytimisestä laskenta-palvelimesta, näiden simulointien ennustettu laskenta-aika kasvoi useista kuukausista jopa vuosiin. Täten työssä päädyttiin tekemään simulointi kah-dessa osassa siten, että ensin simuloitiin koko rakenteen lämpötekni-set olosuhteet maakerrosten kanssa, jotta saatiin rakenteen pinnassa vallitse-vat lämpötilat. Toisessa vaiheessa simuloitiin vastaava rakenne ilman maa-kerroksia, jakamalla rakenteen ulkopinnan olosuhteet yhdeksään osaan, tai lämpötilakenttään, kuvan kaksikymmentähdeksän osoittamalla ta-valla. Toisen vaiheen kosteusolosuhteina käytettiin kaikissa maanvastai-sissa pinnoissa suhteellista kosteutta 100 %. (Heiskanen 2015, 34–37; Laukkarinen, Heiskanen & Vinha 2017, 72–73).



Kuva 29. Malliseinä 1959 rakenteen lämpötilakenttä celsiusasteina, viiden vuoden simulaation lopussa, sekä lämpötila-alueiden jaottelupe-riate (Heiskanen, 2015, 36).

Koska tässä opinnäytteessä haetaan myös käytännön työkaluja maanvas- taisten rakenteiden rakennusfysikaalisten simulointien tekoon, on edellä mainittu Heiskasen kaksivaiheinen simulointimenetelmä turhan paljon ai- kaa vievä ja raskas käytännön suunnittelutyöhön. Tästä johtuen alkuperäi- senä ajatuksena oli tehdä maanvastaisten rakenteiden simuloinnit pääasi- assa yleisesti hyväksytyin vakioarvoin, jotka ovat nähtävissä kuvassa kol- mekymmentä ja ovat todettu soveltuviksi ainakin stationääriseen lasken- tatarkasteluun. (Leivo & Rantala 2002b, 8–9; Heiskanen 2015, 25; Aronen 2017a, 86).

Työn edetessä pyrittiin saamaan simulointeja todenmukaisemmaksi ja ha- luttiin vertailla simuloinnin tuloksia Heiskasen tuloksiin, jotta varmistuttai- siin laskentatavan oikeellisuudesta. Pyrkimys oli saada vaihtelevimmilla maaperän lämpötilan arvoilla yhteneväisiä tuloksia Heiskasen kanssa. Yh- tenä vaihtoehtona harkittiin kellarin seinän reuna-alueen lämpötiloina käytettävän ulkolämpötilan kuukausikeskiarvoja, mutta loppujen lopuksi päädyttiin tiedustelemaan ilmatieteenlaitokselta Jokioisten 2004 vuoden maanalaisia lämpötiloja, joilla voitaisiin tehdä vertailevaa taulukkolasken- ta mallinnuksen tulosten kanssa.

Kellarin seinän ulkopinta:

■ Ylin osa **Jokioinen 2004** ■■■■

■ Keskimmäinen osa ■■■■

• T=Jokioinen 2004 [°C]

• RH = 97 % (vakio)

■ Alin osa ■■■■

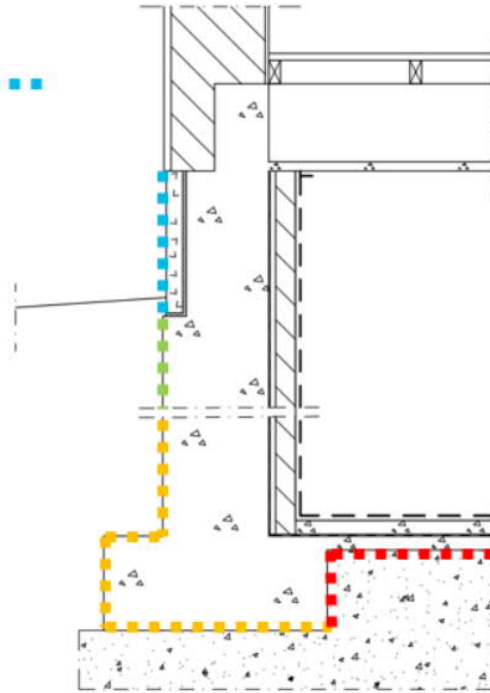
• T=15 °C (vakio)

• RH = 100 % (vakio)

Alapohjalaatta: ■■■■

■ T= 19 °C (vakio)

■ RH=100 % (vakio)



Kuva 30. Vertailtavan kellarirakenteen eri simulointialueiden ulkopinnan simulointiolosuhteet (Aronen 2017b).

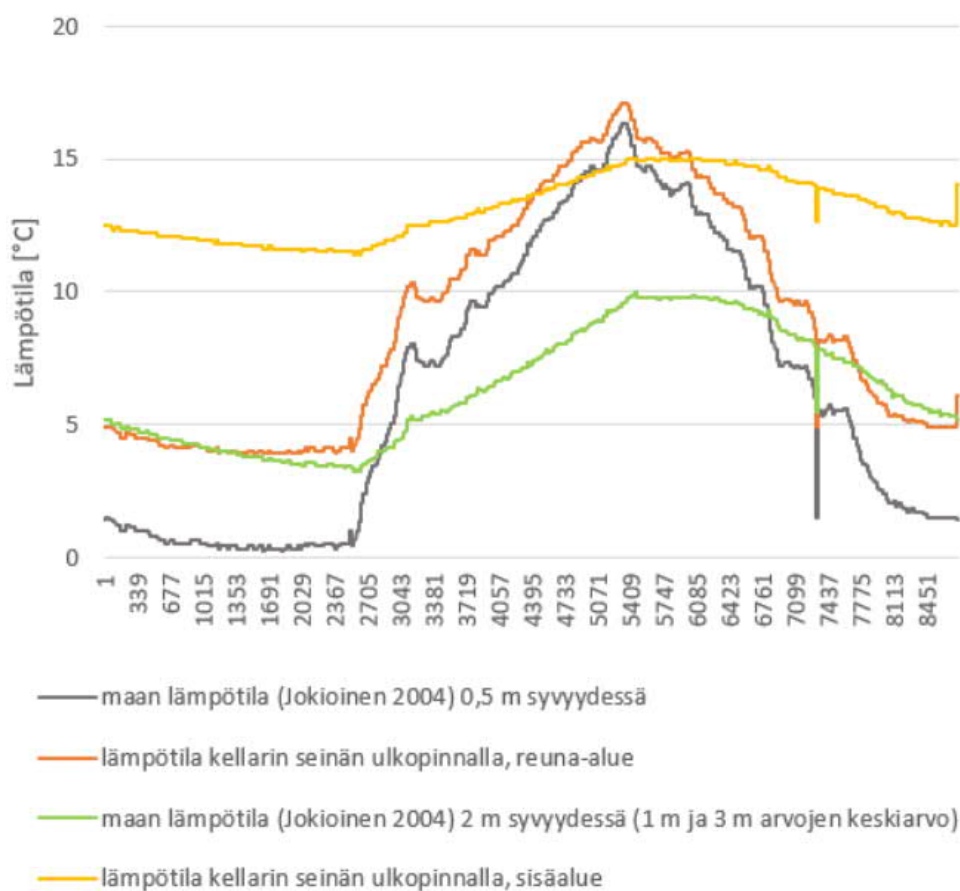
Jokioisilla 2004 on mitattu maan lämpötiloja kerran päivässä, syvyyksillä 0,01 m, 0,2 m, 0,50 m, 1 m, 3 m ja 4 m (Jylhä 2017). Datasta hyödynnettiin laskennassa puolen metrin, metrin ja kolmen metrin syvyydestä mitattujen lämpötilojen arvoja. Yhden ja kolmen metrin arvoista saatiin keskiarvo, jota käytettiin kahden metrin syvyyden lämpötilana. Lämpötilojen kehittyminen em. syvyyksissä Jokioisilla vuonna 2004 on havaittavissa kuvassa kaksikymmentä. Kuvasta huomattiin, että jo kolmen metrin syvyydessä lämpötilojen vaihtelut eivät ole kovinkaan suuria ja ovat koko vuoden osalta vain hieman yli kolme celsiusastetta. Kuitenkin vielä kahden metrin syvyydessä lämpötila on huomattavasti enemmän riippuvainen ulkoilman lämpötilasta.

Mitatut maaperän lämpötilat eivät kuitenkaan ole suoraan hyödynnettävissä laskennan lämpötiloiksi, koska rakennus muodostaa lämmönlähteen maan pinnalla ja siten vaikuttaa rakennusta ympäröivään maa-aineksen lämpötilaan (Laukkarinen, Heiskanen & Vinha 2017, 72). Suomen rakennusmääräyskokoelman osa C4 (Ympäristöministeriö 2002, 19) antaa maanvastaisen rakenteen vieressä olevalle perusmaalle lämmönvastuksen arvoja, joita käytettiin rakenteen ulkopinnan lämpötilan määrittämisen apuna (ks. taulukko yksitoista). Laskenta tehtiin vastaavalle rakenteelle kuin Heiskasen (2015, 30) malliseinä rakenne 1959, ja sen periaatteellinen lämmönvastuksien laskenta ja lämpötilojen muuttuminen eri rakennekerroksissa on esitetty liitteessä 1. Maan lämmönvastuksen arvona käytettiin $0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ reuna-alueella ja sisäalueella arvoa $1 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$, mitkä ovat sa-lajoittamattoman maa-aineksen lämmönvastuksen arvoja.

Taulukko 11. Maan lämmönvastus- ja lämmönjohtavuusarvoja (Ympäristöministeriö 2002, 19).

Maa-aines	Normaalinen lämmönjohtavuus λ_n W/m K	Maan lämmönvastus R_b m ² K/W			
		Perusmaa alapohjan alla		Perusmuurin viereinen maa	
		reuna-alue	sisä-alue	reuna-alue	sisä-alue
1	2	3	4	5	6
Savi					
Hiekka ja sora, salaajittettu	1,4	0,8	3,20	0,40	1,60
Hiesu ja hieta					
Hiekka ja sora, salaajittamaton	2,3	0,50	2,00	0,25	1,00
Moreeni					
Kallio	3,5	0,30	1,20	0,15	0,60

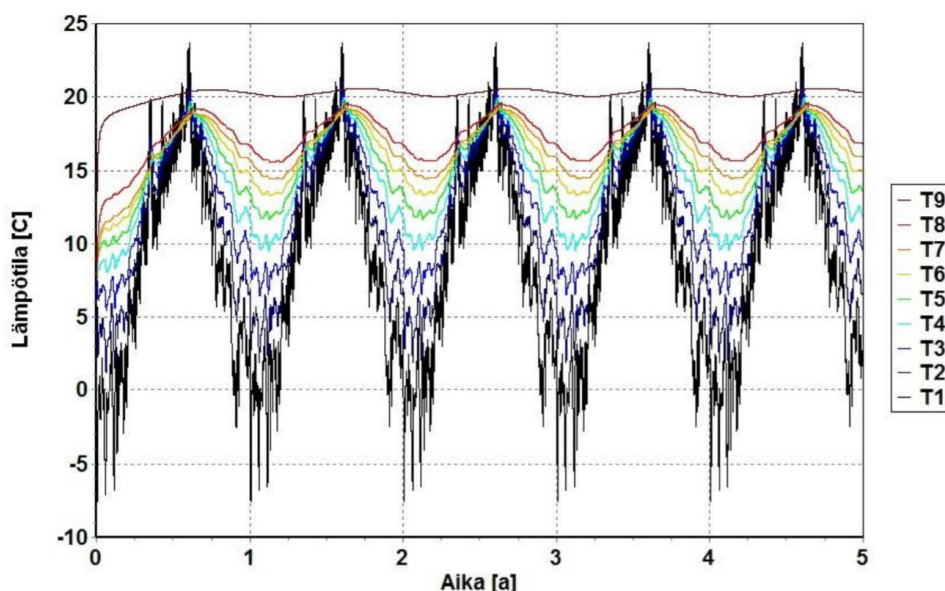
Koko vuoden lämpötekniiset laskentatulokset on esitetty kuvassa kolmekymmentäyksi, jossa on vertailtu kellarin seinärakenteen reuna- ja sisäalueen pintalämpötiloja maan lämpötiloihin vastaavalla syvyydellä. Koska kahden metrin syvyydestä ei ollut mittaustuloksia, käytettiin keskiarvoa metrin ja kolmen metrin syvyydeltä mitatuista lämpötiloista.



Kuva 31. maaperän ja rakenteen ulkopinnan mitattuja ja laskettuja lämpötiloja Jokioisten ilmastossa.

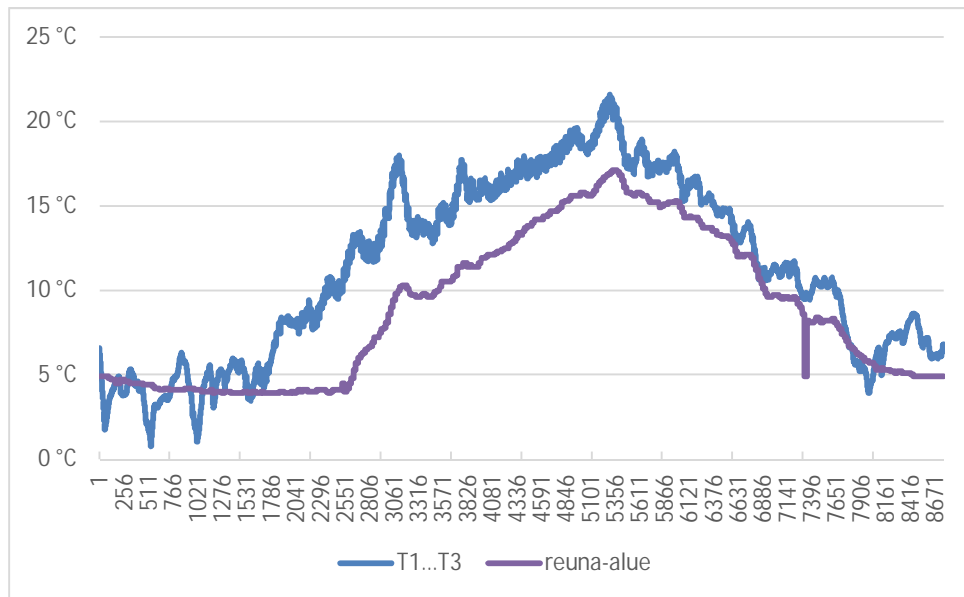
Kuvan kolmekymmentäyksi lämpötiläkäyristä voidaan todeta, että lämpötilaero rakenteen pintalämpötilan ja maan lämpötilan välillä lämpimänä kuukausina on sitä pienempi, mitä lähempänä maan pintaa ollaan, joten voidaan todeta taulukkolaskennan perustuloksien olevan loogisia.

Pintalämpötilojen vertailussa laskentamallien erona on lämpötila-alueiden lukumäärä. Heiskasen (2015, 36) mallissa (kuvat 29 ja 32) seinän lämpötila-alueen korkeus per alue on 0,4 m, ja niitä on yhteensä yhdeksän, mukaan lukien maanvaraisen laatan yhtenä alueena. Vertailulaskennassa pyritään kuvan kolmekymmentä mukaiseen jaotteluun, joka tarkoittaa kahta metrin korkuista lämpötila-aluetta maanalaisen seinän osalta ja yhtä maanvastaisen laatan osalta (Aronen 2017b). Rakennusmääräyskokoelman osan C4, lämmöneristysohjeet 2003 mukaan, maanvastaisen seinärakenteen reuna-alueen korkeus on 1 m, mikä on myös havainnollistettu kuvassa kolmekymmentäyksi (Ympäristöministeriö 2002, 18–19).

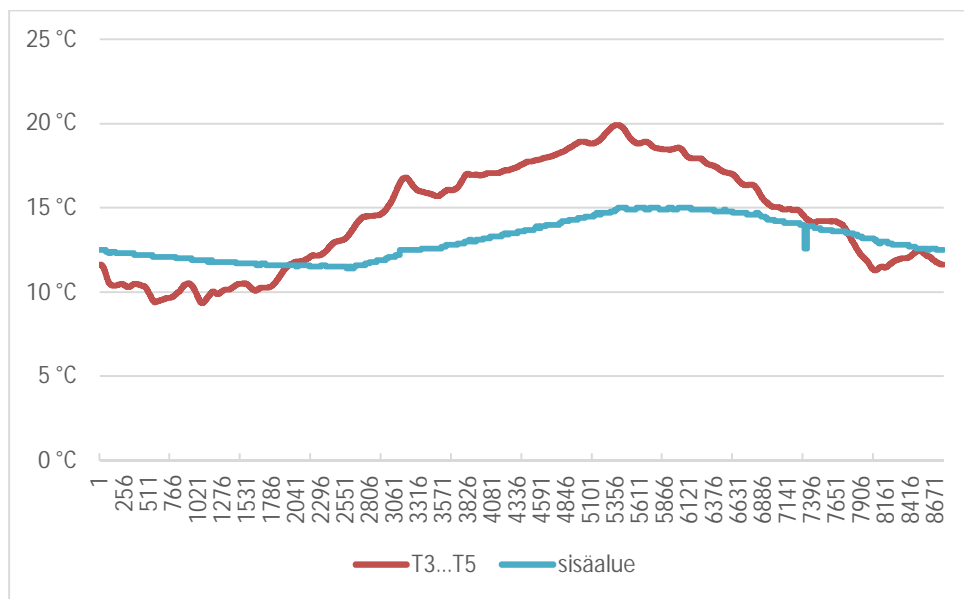


Kuva 32. Malliseinä 1959 -rakenteen lämpötilat T1–T9 alueilla viiden vuoden ajanjakson simulaatiossa celsiusasteina (Heiskanen, 2015, 37).

Seinän ulkopinnan lämpötila-alueiden välillä tehtiin vertailu seuraavasti: Vertailussa käytettiin Heiskasen kuvassa kolmekymmentäkaksi esittämiä lämpötila-alueiden T1–T5 kuukausittaisia keskiarvoja sekä vastaavan malliseinä-rakenteen pintalämpötiloja ja niiden kuukausittaisia keskiarvoja, jotka on laskettu Jokioisilla 2004 mitattujen maanalaisen lämpötilojen ja RakMk C4 (Ympäristöministeriö 2002, 18) perusteella.



Kuva 33. Heiskasen (2015, 37) malliseinä 1959 mallinnuksen ja Jokioisten 2004 vuoden mitattujen maan lämpötila-arvojen avulla laskettujen lämpötilojen erojen vertailu reuna-alueen ulkopinnassa.



Kuva 34. Heiskasen (2015, 37) malliseinä 1959 mallinnuksen ja Jokioisten 2004 vuoden mitattujen maan lämpötila-arvojen avulla laskettujen lämpötilojen erojen vertailu sisäalueen ulkopinnassa.

Lämpötila-alueet muutettiin vastaamaan metrin korkuisia reuna- ja sisä-alueita seuraavasti:

- reuna-alueen lämpötila laskettiin alueiden T1, T2 ja T3 painotettuna keskiarvona
- sisäalueen lämpötila laskettiin alueiden T3, T4 ja T5 painotettuna keskiarvona.

Laskentatulosten eroja voidaan vertailla kuvien 33 ja 34 avulla. Talvikuu-kausina erot ovat hyvin pieniä, kun taas huhtikuusta elokuuhun erot ovat suurempia siten, että mallinnetun rakenteen lämpötiloissa on enemmän vaihtelua ja ne ovat selkeästi lämpimämpiä.

Kokeiltua lämpötilojen laskentatapaa päätettiin hyödyntää rakennusfysi-kaalisen mallin lähtöarvojen luomisessa sen nopeuden ja helppouden ta-
kia.

Maanvastaisen laatan vertailu on selkeämpi tehdä, koska siinä lämpötila-erot ovat pieniä ja sen ajatellaan kellarin tapauksessa olevan yhtä lämpö-tila-aluetta.

Heiskanen mallissa laatan lämpötila (T₉) on koko vuoden 20 celsiusasteen yläpuolella. Simulointimallissa mallin reuna on määritetty adiabaattiseksi, joka tarkoittaa sitä, että reunan kautta ei tapahdu lämmönsiirtymistä. Myös kuvasta 29 voidaan todeta, että laskentamallissa vaikuttavat reunat ovat rakennuksen sisäpinnat ja ulkoilma maan pinnalla. Todellisen raken-
nuksen tilanteessa rakennuksen leveys ja aika vaikuttavat myös laatan lämpötiloihin. (Heiskanen 2015, 34–37; Laukkarinen, Heiskanen & Vinha 2017, 72–73).

Kellarin lattian lämpötilan laskeminen suoritettiin samalla periaatteella kuin maanvastaisen seinänkin. Maan lämmönvastuksena käytettiin RakMK C4:n mukaista sisäalueen arvoa 2 m²·K/W (Ympäristöministeriö 2002, 19). Maan lämpötilana vertailtiin kolmen ja neljän metrin syvyydestä mitattuja maan lämpötila-arvoja. Vertailun lämpötilaerot alemman laatan alapin-
nassa olivat asteen kymmenyksiä ja vaihtelivat ääriämpötilojen arvoilla 19 celsiusasteen molemmin puolin. Aiempi oletus 19 celsiusasteen vakioläm-
pötilasta on erittäin lähellä tätä laskentatapaa.

Kun vertaillaan kahta edellä mainittua lämpötilan määrittystapaa kellarin laatan osalta, lämpötilaero on noin yksi celsiusaste. Ero on niin pieni, että päädyttiin käyttämään C4:n mukaista menetelmää sen matemaattisen yk-
sinkertaisuuden takia, ja koska menetelmää voidaan soveltaa mihin ta-
hansa maanvastaiseen rakenteeseen, kun tiedetään eri tilojen lämpötilat.

Maaperän kosteusolosuhteina päädyttiin käyttämään kuvan kolmekym-
mentä mukaisia arvoja, muutamien tarkennuksin:

- Reuna-alueen ulkopinnan suhteellinen kosteus määritettiin 97 pro-
senttiin ja nostettiin sataan prosenttiin testivuoden Jokioinen 2004
sadetunteina.
- Sisäalueen ja maanvastaisen laatan ulkopinnan suhteellinen kosteus
määritettiin vakioksi sataan prosenttiin.
- Kokeiltiin myös maanvaraisen laatan alla suhteellista kosteutta 97 %,
mikä ei ole kapillaarisella alueella. Tätä käytettiin vain, kun oletettiin
että kohteessa on oikeanlaiset täytöt ja salaojat.

3.7 Rakennustuotteiden rakennusfysikaaliset ominaisuudet

Rakennustuotteiden rakennusfysikaalisista ominaisuuksista on tehty useita opinnäytteitä ja diplomitöitä. Viimeisin virallisemmän tahon listaus on tehty RIL 255-1-2014 Rakennusfysiikka I (2014, 398–480) julkaisussa. Julkaisussa ei ole juurikaan käsitelty vanhempien rakennusmateriaalien rakennusfysikaalisia ominaisuuksia, jotka tulee tietää korjatessa vanhoja rakennusmateriaaleja.

Tässä luvussa käsitellään pääasiassa tutkittavien kapselointimateriaalien ominaisuuksia, listataan tutkittavien materiaalien ja liittyvien maalajien rakennusfysikaalisia ominaisuuksia sekä perehdytään betonin osalta eri aikakausien betonin resepteihin, ja sitä kautta pyritään määrittämään simuloitua varten käytettävät yhteiset arvot betonille.

Betonin huokoisuus ja huokoisuusjakauma määrittävät sen kosteustekniset ominaisuudet. Tähän huokosrakenteeseen vaikuttaa mm. vesisementtisuhte, ilmamäärä, runkoaineen raekoko ja betonin hydratoitumisaste. (RIL 2014, 275; Merikallio, Niemi & Komonen 2007, 21).

Suomessa betonirakentamisen historian alkuvaiheessa veden määrään betonimassassa ei vielä kiinnitetty kovinkaan paljon huomiota, muuten kuin työstettävyyden osalta. Penttalan (1991, 14) mukaan Mikael Strukelin pohjarakennusta käsittelevässä teoksessa vuodelta 1895 on annettu betonin vesisementtisuhteen sallitukseksi vaihteluväliksi 0,5–0,9. Vasta vuoden 1941 betoninormien muutoksissa on edellytetty betonointityön järjestämisen siten, että vesimäärä ja ainesosien sekoitussuhde ovat valamisen aikana todettavissa. (Penttala 1991, 10–20).

Simuloinnissa käytetyt materiaalit on pyritty valitsemaan niin, että ne vastaavat vanhoja rakenteita. Pääasiallisesti materiaalit on haettu Wufi:n tietokannasta, ja muutamat, joita ei ole ollut saatavilla, on määritelty vastaavien materiaalien päälle muuttamalla oleelliset rakennusfysikaaliset ominaisuudet. Esimerkiksi vanhan betonin vesisementtisuhte on oletettu olevan 0,6 tai 0,7. Betonin huokosilman suhteellinen kosteus vaikuttaa kyseisen vesisementtisuhteen omaavalla betonilla diffuusiovastuskertoimeen seuraavanlaisesti: $\mu_{RH\ 35\ \dots\ 70\%} = 127,1$; $\mu_{RH\ 70\ \dots\ 80\%} = 84,8$; $\mu_{RH\ 80\ \dots\ 90\%} = 31,8$; $\mu_{RH\ 90\ \dots\ 95\%} = 7,3$. (RIL 2014, 426–427).

Liitteessä 6 on laskettu betonille diffuusiovastuskertoimet erilaisilla suhteellisen kosteuden arvoilla, kun vanhan betonin vesisementtisuhte on 0,6 tai 0,7. Laskenta on tehty RIL 255-1-2014 liitteen 4 mukaan.

Bitumisivelyn diffuusiovastuserrointa tarkasteltiin useamman lähteen perusteella, ja niissä oli käytetty eri yksiköitä. RIL 107-1989 (1989, 56) julkaisussa esitetään bitumiliosten ja -emulsioiden vesihöyrynläpäisevyys termillä K_p , jonka yksikkönä on $\text{kg}\cdot\text{m}/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$. Björkholtz (2004, 56) esittää bitumikerroksen vesihöyrynvastuksen termillä Z_p , jonka yksikkönä on

(m²·s·Pa)/kg. Vaihteluvälit edellä mainituilla yksiköillä esitettynä olivat seuraavat:

- sivelvä bitumiliuos, 0,4...2 x 10⁻¹⁵ kg·m/(m²·s·Pa)
- vesihöyrynpitävä sivelvä bitumiemulsio, 14 x 10⁻¹⁵ kg·m/(m²·s·Pa), enintään
- bitumikerros, 500...1000 x 10⁹ (m²·s·Pa)/kg.

Julkaisun RIL 107-1989 (1989, 10) mukaan termin K_p suhde muihin käytettyihin arvoihin voidaan selvittää kaavalla (7).

$$K_c = \frac{R \cdot T}{M} \cdot K_p = \delta_v \quad (7)$$

, jossa

R = kaasuvakio, 8314,3 J/kmol·K

T = lämpötila [K]

M = Vesihöyryn molekyylipaino, 18,02 kg/kmol

δ_v = ilman vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmaistuna [kg/(m·s·Pa) tai m²/s].

Bitumisivelyn diffuusiovastuksen vertailu on tehty liitteessä 8. Valittiin arvoksi $\mu = 75000$, kun tarkastellaan 1 mm paksuista kerrosta. (Björkholtz 2004, 56; RIL 1989, 10, 56; RIL 2014, 393).

Taulukko 12. Kapselointituotteiden diffuusiovastuskertoimet (Aronen 2017a, 87)

Kapselointituote	Diffuusiovastuskerroin, μ [-]	Suhteellinen diffuusiovastuskerroin, S_d [m]	Vesihöyrynläpäisykerroin, W_p [10 ⁻¹² kg/(m ² sPa)]	Haitta-aineläpäisevyystutkimus
Tuote 1: 0,5 mm	270600 *	135,3 *	1,39	Kyllä
Tuote 1: vertailu 1 mm	<u>128800</u>	128,8	1,46 *	
Tuote 2: 1 mm	820	0,82 *	229,268	Kyllä

Simuloinnissa käytettyjen kapselointituotteiden diffuusiovastukset saatiin valmistajilta. Arvot muunnettiin tarpeen mukaan vastaamaan millimetrin paksuista kerrosta, jolle laskettiin diffuusiovastuskerroin muunnoskaavojen avulla. Käytetty arvo on esitetty taulukossa kaksitoista alleviivattuna. Kapseloinnin diffuusiovastuskertoimien ollessa aivan eri luokkaa päädyttiin tekemään 1D-simuloinnit lähtötilanteesta ja simulointi tiiviimmän kapseloinnin kanssa. 2D-simuloinnit tehtiin vain tiiveimmälle kapselointituotteelle (tuote 1). Tähdellä merkityt arvot ovat valmistajan ilmoittamia. Diffuusiovastuskertoimien vertailulaskelma on esitetty liitteessä seitsemän.

Laskennan lähtötilanteeksi kaikille materiaaleille on määritelty alkulämpötila ja huokosilman suhteellinen kosteus. Alkulämpötilaksi määriteltiin 20 °C, pois lukien verhoustiilet ja graniittisokkeli, joiden alkulämpötilaksi määriteltiin 15 °C. Suhteelliseksi kosteudeksi alkutilanteessa määriteltiin 80 %.

4 RAKENNUSFYSIKAALINEN RISKIANALYYSI JA RISKIRAKENTEET

Suunnittelussa Lehtinen (2003, 446) edellyttää rakenteiden riskiarviot tehtäväksi luonnosvaiheessa ja määrittelee riskiarvion tehtäväksi käyttäen apuna mm. toimintapiirroksia, tarkistuslistoja ja laskelmia. Rakennusfysikaalisessa riskiarviossa tulee huomioida myös toteutettavuus, elinkaari ja pitkäaikaiskestävyys.

Tässä luvussa käydään läpi myös tutkittavien rakenteiden erilaiset rakennetyypit, niiden toimintaperiaate, riskit, yleisyys sekä suurpiirteiset esiintymisajanjaksot.

Koska tässä työssä käsitellään korjausrakentamista, voidaan ajatella riskien jo toteutuneen, koska on tarve korjata rakenne. Tässä yhteydessä käsitelläänkin korjattavan rakenteen suunnittelun, toteutuksen ja käytön aikaisia riskejä.

4.1 Riskianalyysimenetelmät ja riskien hallinta yleisesti

Suomen rakennusinsinöörien liiton oppaassa, RIL 241-2016 Erityismentetelyn soveltaminen (2016, 22–23) todetaan yleisesti riskien hallinnan sisältävän laadunvarmistukseen, johon sisältyy

- riskien tunnistaminen
- riskien analysointi ja niiden mittaaminen
- riskien hallintasuunnitelman tekeminen, siitä tiedottaminen ja toteuttaminen
- tulosten mittaus, arviointi ja dokumentointi
- mahdollinen hallintasuunnitelman päivitys tulosten perusteella.

Itse riskianalyysi voidaan määritellä prosessiksi, jolla tunnistetaan haitallisten seurausten todennäköisyys ja laajuus tarkasteltavan asian johdosta. Haitallisia seurauksia tarkastellaan yleensä ihmisten, omaisuuden ja ympäristön näkökulmasta. Kuvasta kolmekymmentäviisi voidaan todeta riskianalyysin olevan osa riskienhallinnan kokonaisuutta. (Heikkilä, Murtonen, Nissilä, Virolainen & Hämäläinen 2007, 7).

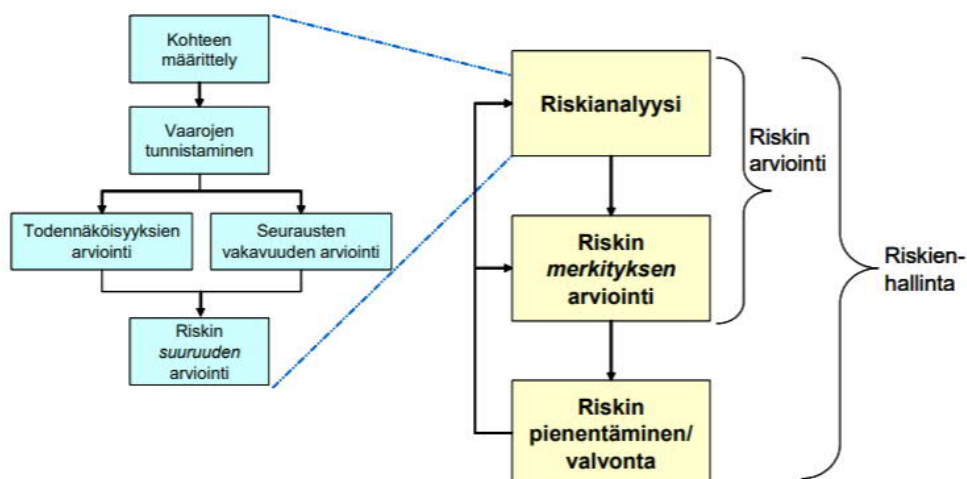
Yleisen riskiteorian mukaan riskin suuruutta voidaan arvioida matemaattisesti riskin suuruuden avulla. Sen määrittää odotettavissa olevat seuraukset eli vahingon suuruus ja todennäköisyys. Riskitulo, R , on esitetty alla kaavassa (8). (RIL 2016, 15–16).

$$R = T \cdot S \tag{8}$$

, jossa

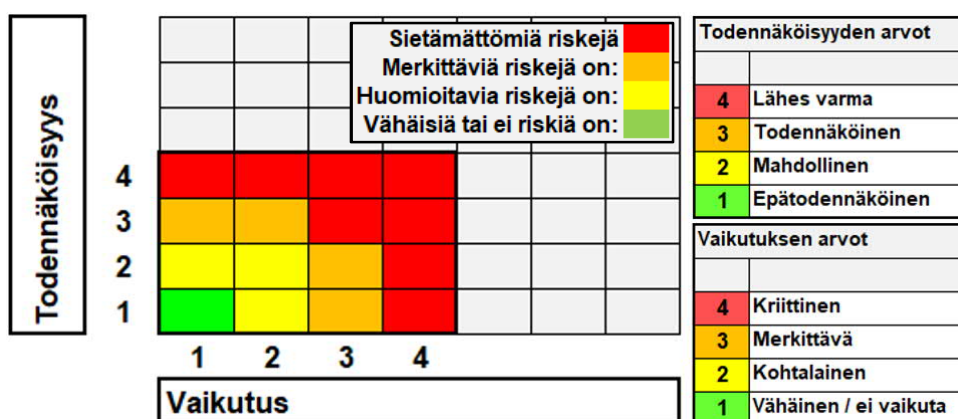
T = tapahtuman todennäköisyys

S = vahingon suuruus, vakavuus eli seuraukset. (RIL 2016, 16).



Kuva 35. Riskianalyysi riskienhallinnan osana (Heikkilä ym. 2007, 7).

Riskituloa voidaan tarkastella myös visuaalisesti riskimatriisin avulla. Esimerkki riskimatriisista 4 x 4 on esitetty kuvassa kolmekymmentäkuusi. Riskimatriisin koko voidaan määrittää vapaasti, mutta Kangas (2014, 6) suosittelee käyttämään parillisia matriisikokoja, koska muuten suuri osa riskeistä jää keskimmaiseen riskiluokkaan epävarmuuden korostuessa, jolloin riskien keskinäiset erot, ja niihin suhtautuminen voi muuttua.



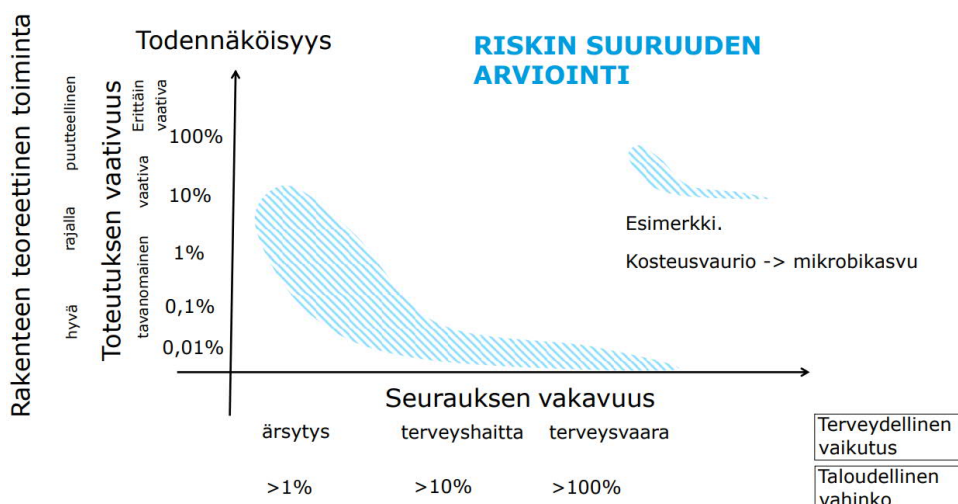
Kuva 36. Esimerkki riskimatriisista (Kangas 2014, 6–13 mukailten).

Kuvan kolmekymmentäkuusi riskimatriisista voidaan todeta nopeasti riskit, jotka vaativat toimenpiteitä. Jos esimerkiksi todetaan rakenteessa vaikutukseltaan kohtalainen, mutta todennäköinen riski, esim. todetaan kosteuden tiivistyminen stationäärilaskennalla, voidaan matriisin avulla todeta, että riskin suuruus on merkittävä. Jos taas saman riskin vaikutus olisi merkittävä, riskin suuruus olisi sietämätön ja voisi johtaa automaattisesti riskin todennäköisyyden pienentämiseen esimerkiksi rakennetta muuttamalla.

Heikkilä ym. (2007, 7) esittää, että riskianalyysillä etsitään vastauksia seuraaviin kysymyksiin:

- Milloin kohteessa tapahtuu ei-toivottuja seurauksia?
- Minkälaisia vaikutuksia ko. seurauksilla on?

- Mikä on edellä mainittujen asioiden todennäköisyys?



Kuva 37. Rakenteen riskin arviointi (Knuutila 2016 mukailleen).

Edellä kuvattu riskianalyysi vaatii tekijältään paljon kokemusta, lisäksi rakenteiden riskien arvioinnista ei löydy alan kirjallisuudesta juurikaan esimerkkejä (Knuutila 2017, 39–40). Kuvassa kolmekymmentäseitsemän on esitetty rakenteen riskianalyysin periaate rakennusfysikaalisen toimivuuden perusteella siten, että rakenteen teoreettinen toiminta ja toteutuksen vaativuus on otettu huomioon vahingon todennäköisyyden suhteen. Seurauksen vakavuutta on arvioitu terveydellisen ja taloudellisen vahingon perusteella.

4.1.1 Erityismenettely ja rakennusfysikaalisen toimivuuden riskiarvio

Maankäyttö- ja rakennuslaissa (2014/41 § 150) määritellään erityismenettelyn tarve rakennushankkeelle. Rakennuslupaviranomainen päättää hankkeen erityismenettelyn tarpeesta, käyttäen hyväksi mm. suunnittelu-ryhmän toimittamaa riskiarviota. Rakennusvalvontaviranomainen määrää erityismenettelyn laajuuden sekä kohdentumisen. Erityismenettely voidaan kohdentaa johonkin tiettyyn osa-alueeseen, esimerkiksi perustuksien tai maanvastaisten seinien rakennusfysikaalisen toimivuuden varmistamiseksi.

Oppaassa RIL 241-2016, Erityismenettelyn soveltaminen (2016, 20) määritellään riskiarvion sisältävän seuraavat:

- suunnittelun ja toteutuksen vaativuuden arviointi sekä niihin liittyvän vahingon todennäköisyyden arviointi
- korjaamisen vaativuus (ainoastaan korjauskohteissa)
- vahingon seuraamukset
- ylläpidon ja käytön vaativuus
- ympäristön rasitukset ja ympäristöolosuhteiden vaativuus
- laatijan ehdotuksen tarvittavista erityismenettelyn toimenpiteistä.

Riskiarvio toimii erityismenettelyn tarpeen kartoitustyökaluna, ja se sisältääkin usein samoja aiheita kuin varsinainen riskianalyysi. Kuvassa kolmekymmentäviisi on esitelty aiheita, kuten kohteen määrittely sekä vaarojen tunnistaminen, jotka on määritetty kuuluvaksi riskianalyysiin. Ne yleensä tunnistetaan jo riskiarviossa. (RIL 2016, 19).

RIL 241-2016 (2016, 109–111) oppaan liitteessä 3 on esitetty valmiita lomakepohjia erilaisille riskiarvioille: rakenteelliselle turvallisuudelle, rakennusfysikaaliselle toimivuudelle ja paloturvallisuudelle. Rakennusfysikaalisen toimivuuden riskiarviolomakkeessa on omat kohtansa korjauskohteille ja kosteusvauriokorjauskohteille. Kyseessä olevien kohtien huomioitavia asioita työn aihepiiristä ovat mm.

- rakenteen muutos rakennusfysiikan kannalta oleellisesti vaativammaksi
- vaurioituneita materiaaleja ei voida poistaa suojelullisista syistä johtuen
- korjaukseen liittyy erityisiä teknisiä järjestelmiä (mm. alipaineistus)
- rakenteissa on poikkeuksellisen paljon rakennusmateriaaliperäisiä tai muita haitta-aineita.

4.1.2 Kosteusteknisen riskin arviointi

Rakennusfysikaalisen toimivuuden riskiarvioon kuuluu osana myös rakennuksen kosteusriskiluokan arvio RIL 250-2011, Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen (RIL 2016, 110) mukaisesti. Kosteusriskiluokalle, R on kolme luokkaa, jotka on esitetty taulukossa kolmetoista (RIL 2011, 29).

Taulukko 13. Kosteusriskiluokat (RIL 2011, 28 mukaillen).

Kosteusriskiluokka	Hankkeen vaativuus	Esimerkkejä
1	Normaali	Tavanomaiset asuin-, liike- ja toimistorakennukset (normaalimenettely). Rakennukset, joissa on ihmisiä vain satunnaisesti tai rakennuksen suunniteltu käyttöikä on normaalia lyhyempi (kevennetty normaalimenettely).
2	Normaalia vaativampi	Normaalia vaativammat asuin-, liike- ja toimistorakennukset. Koulut ja päiväkodit.
3	Erittäin vaativa	Rakennukset, joissa on suuri kosteusrasitus (mm. uimahallit, kostutetut tilat, pakkasvarastot) tai jotka ovat muuten kosteudenhallinnan suunnittelun, toteutuksen, ylläpidon tai käytön kannalta vaativia.

Kosteusteknisen riskin todennäköisyyttä ja kriittisiä teknisiä laatutekijöitä voidaan tarkastella myös rakenteiden todennettujen vaurioiden ja niiden syiden perusteella (RIL 2011, 189).

RIL 250-2011 (2011, 189–198) oppaan liitteessä 4 on esitetty tällaiset todetut kosteusvaurioiden tarkastuslistat eri rakenneosille. Alla on esitettyä muutamia nostoja maanvastaisten perustusten sekä alapohjien ongelma-aihealueista:

- maakosteus, salaojat, kapillaarinen ja diffuusiolla tapahtuva kosteuden siirtyminen sekä pohjaveden korkeus
- sadevedet ja niiden puutteellinen ohjaus
- kylmäsillat ja kosteuden tiivistyminen kylmiin pintoihin
- märkätilojen ja putkistojen vesivuodot ja niiden havaitseminen
- liian tiiviin pinnoitemateriaalin käyttö tai rakenteen jääminen kahden tiiviin pinnan väliin
- kellarin seinän puutteellinen vesieristys tai huono sijainti rakenteessa
- korkea sisäilman kosteus, johtuen esimerkiksi puutteellisesta ilmanvaihdosta
- ulkoseinän ja perusmuurin liitoksen puutteellinen tiiveys
- puutteellinen vuotovesien poistumismahdollisuus sokkelihalkaisusta.

4.1.3 Kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmä

Kaikkia edellä mainittuja riskitekijöitä ei ole mahdollista todentaa laskennallisilla menetelmin, mutta rakenteen tarkemmassa tarkastelussa tulisi pystyä varmistumaan esimerkiksi rakenteen kuivumiskapasiteetista (RIL 2011, 10).

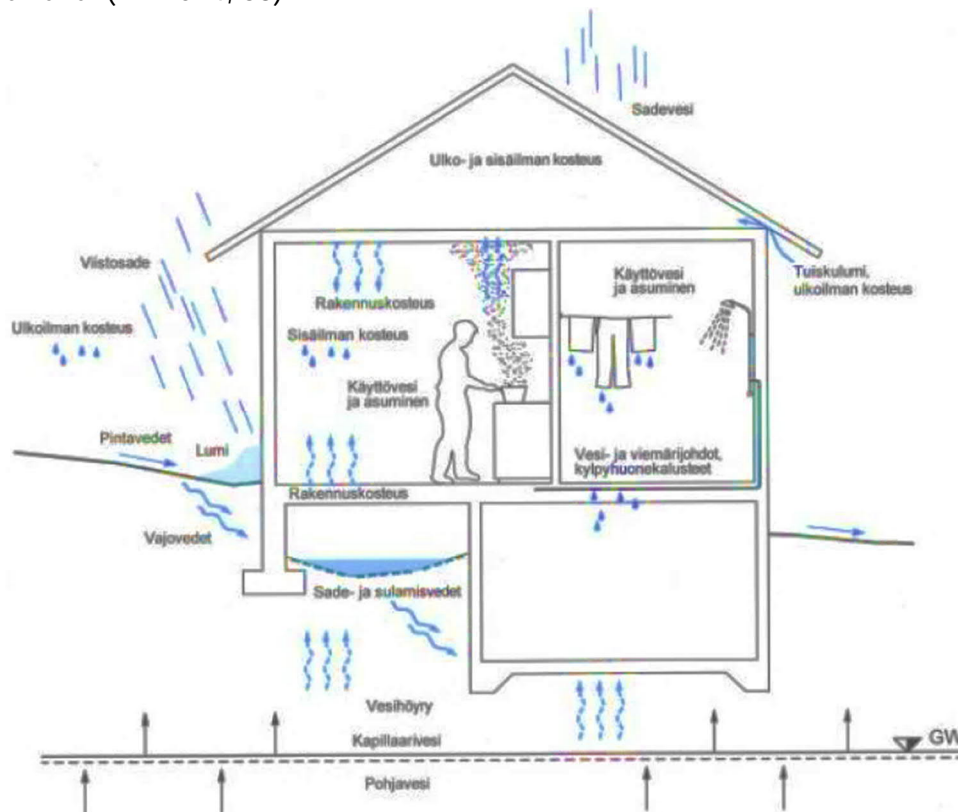
Tampereen yliopisto (Vinha ym. 2013, 42–66) on eri hankkeiden yhteydessä (mm. Frame) kehittänyt laskentamenetelmiä rakennusfysikaalisten riskien arviointiin. Tämän analysointimenetelmän kehitys on alkanut jo 2000-luvun alussa ja sen yhteydessä on tehty mm. seuraavia ohjeistuksia ja laskentamenetelmiä, joita käytetään tässäkin työssä:

- rakennusmateriaalien ominaisuuksien määrittäminen
- sisäilman mitoitusolosuhteiden määrittäminen
- rakennusfysikaaliset testivuodot
- Suomalainen homemalli.

Laskentamenetelmät on osittain kuvattu aikaisemmin luvussa kolme. Tämän lisäksi kuvassa kaksikymmentäneljä on kuvattu analysointimenetelmän käyttöä, sekä sen iteratiivista käyttöprosessia. Vaikka kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmässä onkin vielä paljon kehitettävää, voi menetelmällä saada jo nyt paljon tarkempia laskentatuloksia kuin aiemmin, ja sitä voi käyttää esimerkiksi kosteusteknisen toiminnan optimointiin suunnittelun yhteydessä. (Vinha ym. 2013, 43–44).

4.2 Rakennusten kosteuslähteet ja kosteusvaurioiden muodostuminen

Rakennusten kosteuslähteet voidaan jakaa rakentamisen ja käytön aikaisiin kosteuslähteisiin. Rakentamisen aikana materiaaleja tulee suojata ylimääräiseltä vedeltä, jolloin huomioon tulee ottaa mm. sadevedet, pintavesien ohjaus sekä materiaalien suojaus. Rakentamisessa käytetään myös vettä, joten ylimääräisen kosteuden kuivuminen esim. betonirakenteista tulee ottaa huomioon rakennusaikana. Kuivuminen voi jatkua myös käytön aikana. (RIL 2014, 38).



Kuva 38. Rakennuksen kosteuslähteet (RIL 2014, 39).

Käytön aikaiset kosteusrasitukset muodostuvat ulkoisista ja sisäisistä kosteuslähteistä. Rakennusvaippa suojaa rakennusta ulkoisilta kosteuslähteiltä, joita on mm. sade eri muodoissaan sekä maaperän ja ilman kosteus. Normaalikäytössä sisäisiä kosteuslähteitä syntyy pääasiassa ihmisen toiminnasta. Kuvassa kolmekymmentäkahdeksan on esitetty rakennuksen sisäisiä ja ulkoisia kosteuslähteitä. (RIL 2014, 39–41).

Vuodot muodostavat merkittävän osan vaurioittavista kosteuslähteistä, koska niiden kautta voi siirtyä huomattavia kosteusmääriä huomaamatta rakenteeseen pitkällä aikavälillä. Erilaisia vuotoja on mm. putkistojen ja laitteistojen vuodot sekä kosteus ja vedenerityksien vuodot. (RIL 2011, 69).

Vesi ja kosteus kaikissa olomuodoissaan rasittaa ja voi lisäksi vaurioittaa rakennusmateriaaleja. Jos rakennusmateriaali kuitenkin kuivuu pian kastumisensa jälkeen, ei vaurioituminen ole kovinkaan todennäköistä. (Siikanen 2014, 65).

Pitkiä aikoja kosteissa oloissa olevat materiaalit voivat homehtua, tai kun materiaalina on puu, se voi myös lahota. Tällöin kosteuspitoisuuden tulee olla vielä korkeampi kuin homehtumisen tullessa kysymykseen. Kosteiden rakenteiden jäätyminen voi myös vaurioittaa rakenteita mekaanisesti, koska vesi laajenee jäätyessään. (Siikanen 2014, 65).

Työssä päätettiin sallia kosteuden kondensaatio rakenteisiin, mutta sen raja-arvoksi määritettiin 1000 g/m². Raja määräytyy homehtumisherkkyysluokkien HHL3 ja HHL4 mukaan, perustuen standardiin DIN 4108-3, vuodelta 1981. Raja on sama, jota käytettiin Tampereen yliopiston Frametutkimusprojektissa (Vinha ym. 2013, 61–62).

4.3 Tutkittavat riskirakennetyypit ja kosteusriskit

RIL 255-1-2014 kirjassa esitellään muutamia riskirakenteita, joita on aiemmin pidetty hyvän rakentamistavan mukaisina.

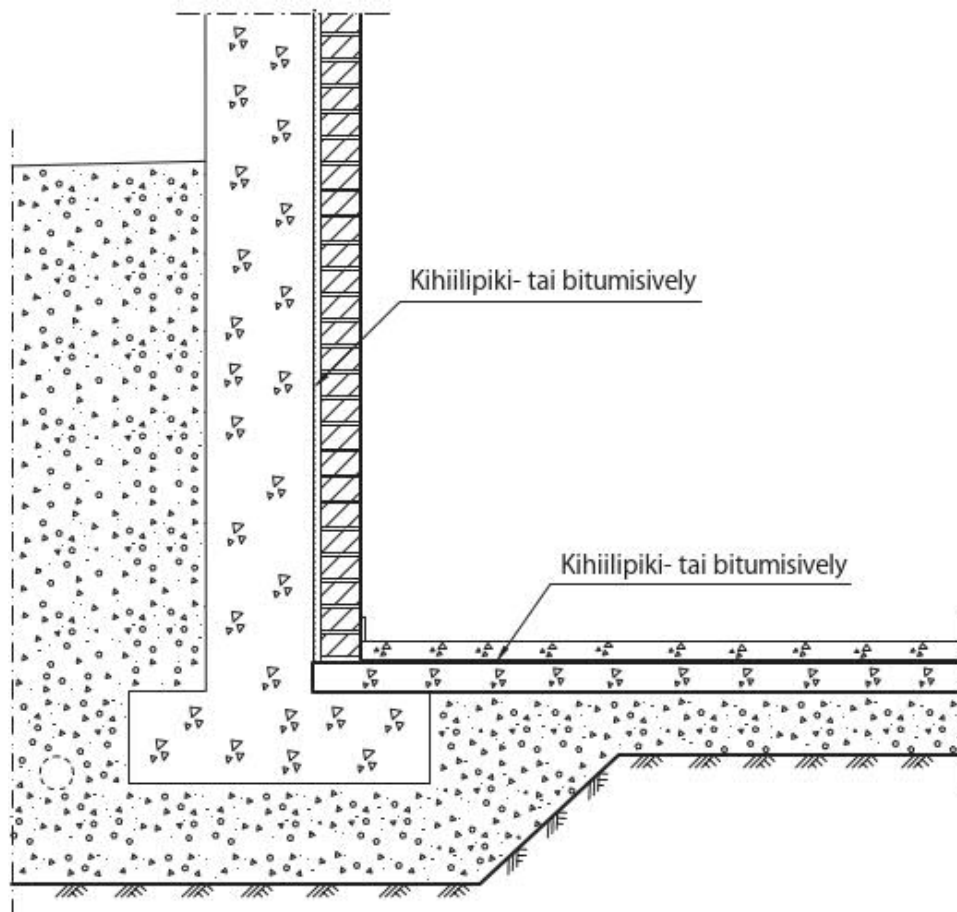
4.3.1 Maanvastaiset rakenteet

Maanvastaisilla rakenteilla tässä yhteydessä tarkoitetaan maanvaraisia lattioita, kellarin ulkoseiniä ja sokkelirakenteita.

Maanvaraisella alapohjalla tarkoitetaan perusmaan tai täyttömaan varaan tehtyä rakennetta. Maanvaraisella tarkoitetaan, että rakenne siirtää kuormat suoraan alla olevalle perusmaalle. Maanvastainen taas tarkoittaa sitä, että rakenne on tehty samalla tavalla kuin maanvarainenkin, mutta kuormat siirtyvät ympäröiville kantaville rakenteille. Maanvaraiset lattiat jaetaan tässä yhteydessä kaksoislaattarakenteeseen ja laatan alta eristettyyn rakenteeseen. (Leivo & Rantala 2006, 8).

Kaksoislaattarakenne on maanvastainen rakenne, jota on käytetty pitkänä ajanjaksona aina 1900-luvun alkupuolelta aina 70-luvulle asti. Joskus kahden laatan välissä saattaa olla lisäksi lämmöneristyskerros, joka on myöhempien aikojen lisäys. (Neuvonen 2006, 81, 133, 139, 197). Kaksoislaattarakenne on tunnistettu riskirakenteeksi, etenkin silloin kun eristeenä kahden laatan välissä on käytetty lastuvillalevyä lämmöneristeenä (RIL 255-1-2014, 166).

Lämmöneristyslevyt asennettuna betonilaatan alle maata vasten yleistyi 70-luvulla, ja tämä on yleisesti käytetty rakennetyyppi vielä tänä päivänäkin. 1970–1990-luvuilla lämmöneristeen alapinnassa on käytetty myös muovikalvoa, jota yleisesti pidetään riskirakenteena. Muovi saattaa sijaita myös betonilaattaa vasten (RIL 255-1-2014, 156; Hometalkoot 2016a, 20; Hometalkoot 2016b, 20; Hometalkoot 2016c, 18).



Kuva 39. 1920–1960 lukujen tyypillinen kerrostalon maanvastainen seinä ja kaksoislaattarakenne (Komulainen ym. 2011, 101).

Maanvastaiset kellarin seinärakenteet ovat kellarinseinä, joista tässä työssä käsitellään seuraavia:

- massiivibetoniseinä bitumisivelyllä ja verhomuurauksella (ks. kuva kolmetoista)
- massiivibetoniseinä bitumisivelyllä, lämpöeristeellä ja verhomuurauksella.

Kummassakin vaihtoehdossa bitumisively on massiivibetonirakenteen sisäpinnassa, joka nyky-ymmärryksen valossa on todettu rakennusfysikaalisesti toimimattomaksi, koska betonirakenne pysyy kosteana ja kylmänä läpi vuoden. (RIL 255-1-2014, 169).

4.3.2 Massiiviset seinärakenteet

Tyypillisiä tuulettumattomia massiivirakenteita ovat hirsiseinä ja massiivitiiliseinä. Tämän tyyppisen seinärakenteen toimivuus perustuu siihen, että niiden ulkopinnassa on riittävän vesitiivis, mutta tarpeeksi vesihöyryavoin pinta. Vettä voi sateella imeytyä rakenteeseen vähäisessä määrin, mutta rakenne pystyy kuitenkin kuivumaan myös ulospäin. (RIL 2014, 43).

Kivi- ja tiilipohjaiset massiivirakenteet ovat hyvin kosteutta kestäviä. Tosin vanhemmissa rakennuksissa sisäpuolisessa rappauksessa on saatettu käyttää jotain orgaanista materiaalia, joka voi vaurioitua kosteuden johdosta. Yleensä massiivisissa rakenteissa vesivalumareitit ovat pääasiassa rakenteen pinnoilla. (Ympäristöministeriö 2016, 161).

4.3.3 Rankarakenteiset seinärakenteet

Rankarakenteiset seinät koostuvat nimensä mukaisesti joko puurangoista, metallirangoista tai näiden molempien yhdistelmästä. Rankarakenteen väli on täytetty lämpöeristeellä ja ulkopinta usein verhottu tuulensuojalevyllä ja sisäpinta rakennuslevyllä. Rankarakenteinen seinä voi olla kantava tai ei kantava rakenne. Rankarakenteisten seinien tiiveys saavutetaan yleensä ilman- tai höyrynsulkukalvolla, jolloin sen ominaisuudet sekä sijainti vaikuttavat seinärakenteen rakennusfysikaaliseen toimintaan olennaisesti.

Rankarakenteiset seinät yleistyivät edullisuutensa takia pientalorakentamisessa 50-luvulla, ja ne ovat edelleen suuresti edustettuna, varsinkin pientaloteollisuudessa. Rankarakenteisten seinärakenteiden toimivuuden lähtökohta on rakennekerrosten vesihöyrynläpäisevyyden kasvu seinän sisäpinnasta tuuletusväliä kohti. (Hometalkoot 2016d, 1).

4.4 Tapaustutkimuksissa käytettävät riskien hallintamenetelmät

Käytetään seuraavia menetelmiä riskien suuruuden ja hyväksyttävyyden arvioinnissa:

- alustava riskiluokitus rakenteelle julkaisun RIL 250-2011, Kosteuden hallinta ja homevaurioiden estäminen liitteiden 4 ja 5 listauksien mukaan
- stationäärilaskenta alustavaan kosteus- ja lämpötarkasteluun
- rakenteen riskianalyysi riskitulon, R avulla
- 1D-epästationäärinen kosteus- ja lämpötekninen laskenta Wufi PRO- ohjelmalla
- 2D- epästationäärinen kosteus- ja lämpötekninen laskenta Wufi 2D-ohjelmalla
- homeindeksin määrittäminen epästationäärisen laskennan perusteella
- riskien arviointi toteutuksen tai lopullisen toimivuuden perusteella, käyttämällä kuvan kolmekymmentäyhdeksän riskimatriisia.

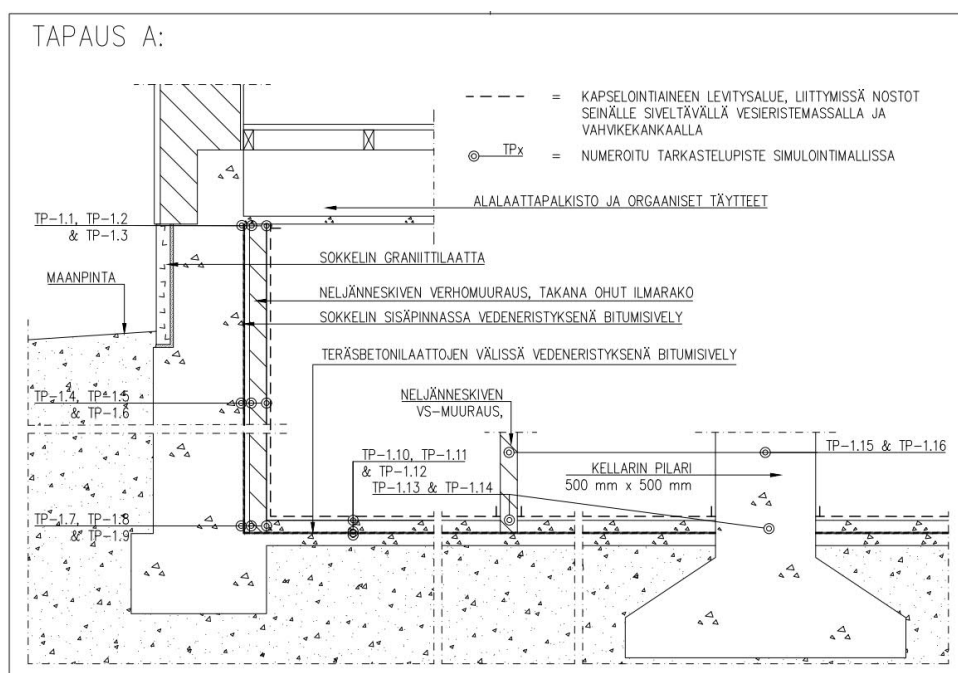
5 TAPAUSTUTKIMUKSET

Tutkittavat rakennukset rajattiin kolmeen maanvastaiseen kokonaisrakenteeseen. Rakenteet eivät edusta mitään tiettyä korjauskohdetta, vaan edustavat aikakaudelleen tyypillisiä ratkaisuja. Jokaisessa alkuperäisessä mallirakenteessa oletetaan olevan kapseloitava materiaali tai vaurio, jonka takia rakenne korjataan kapseloimalla. Kaksi tapauksista on samankaltaisia kellarirakenteita ja yksi tapaus uudempi rakennuskohde, jossa tarkastellaan alapohjalaattaa.

Kaikkien tapauksien rakenteista tehtiin alustava riskiarvio ja kolmen vuoden mittainen lämpö- ja kosteussimulointi, joiden avulla arvioitiin rakenteen pitkäaikaistoimintaa.

5.1 Tapaus A

Tutkittava kohde on tyypillinen 1920 – 1960 -lukujen kerrostalojen maanvastainen kellarirakenne, jossa vedeneristeenä käytetyssä kivihiilipiessä tai bitumisivelyssä on usein haihtuvia yhdisteitä haitallisissa määrin (Komulainen, J., Huttunen, J. & Sääntti, J. 2010, 101). Kuvassa neljäkymmentä on esitetty simuloitavan tapauksen periaatteellinen rakenneleikkaus, jossa on esitetty myös tarkastelupisteet simulointimallissa.



Kuva 40. Kohde A:n rakenneleikkaus (kuva isompana liitteessä 1)

Kapselointikorjaus halutaan tehdä rakenteen bitumisivelistä löytyneiden PAH-yhdisteiden takia. Kivihiilipikeä ja PAH-yhdisteitä tavataan tarkastellun aikakauden rakennuksissa yleisesti. (Komulainen ym. 2010, 99–100; Neuvonen, Mäkiö & Malinen 2002, 60–63).

5.1.1 Alkuperäisen rakenteen riskianalyysi

Rakenteessa on maanvastainen ulkoseinä sisäpuolisella vesi- ja lämpöeristyksellä sekä eristämätön alapohjalaatta, jotka molemmat ovat tunnistettuja riskirakenteita liittymineen. Toisaalta tapauksessa analysoitujen rakenteiden materiaalit ovat homeutumisherkkyysluokaltaan kohtalaisen kestäviä eli homeutumisherkkyysluokkaa kolme. Toisaalta kellarin katon rakenteen täytteenä on orgaanista materiaalia.

Kapselointikorjauksen muina riskeinä voi pitää kapselointiaineen kiinnityksymisen tiiliverhouksen pinnassa ja kapseloinnin liittymät tiiliväliseinä. Varsinkin tapauksessa, jossa kosteutta kertyy seinän alareunaan.

Bitumisivelyn tekninen käyttöikä on tullut tiensä päähän, joten oletettavasti bitumisivelyssä on puutteita, jotka osaltaan lisäävät kosteusrasitusta.

Alkuperäisen rakenteen toimintaa tarkasteltiin alustavasti stationäärinen laskelman avulla. Stationäärinen laskenta tehtiin Excel-taulukkolaskennalla Jokioisen vuoden 2004 kuukausikeskiarvojen avulla ja on esitetty taulukossa neljätoista. Sisäilman keskiarvokosteuksien laskenta on esitetty liitteessä kaksitoista.

Taulukko 14. Kohde A:n alkuperäisen rakenteen stationääritilan laskelma lokakuun keskiarvotilanteessa Jokioisilla 2004 ulkoilmaa vasten.

Aine	d (m)	λ (W/mK)	R _i	R _i /R _T	t	pk	Z _i	Z _i /Z _{kok}	p _i (Pa)	RH (-)
					21	2485,8			1516,3	0,61
R _{si}			0,13	0,178						
					18,1	2080,9			1516,3	0,61
-	0	1	0	0			0,00E+00	0,000		
					18,1	2080,9			1516,3	0,73
Tiili	0,075	0,6	0,13	0,171			5,98E+09	0,012		
					15,4	1747,2			1507,6	0,86
Ilmarako	0,02	0,13	0,15	0,211			5,96E+10	0,118		
					12,0	1401,6			1421,1	1,01
Bitumisively	0,001	0,5	0	0,003			3,99E+11	0,787		
					11,9	1397,5			841,6	0,6
Betoni	0,35	1,6	0,22	0,3			1,35E+10	0,027		
					7,1	1010,4			821,9	0,81
Graniitti	0,1	1,66	0,06	0,083			2,87E+10	0,057		
					5,8	921,8			780,2	0,85
-	0	1	0	0			0,00E+00	0,000		
					5,8	921,8			780,2	0,85
-	0	1	0	0			0,00E+00	0,000		
					5,8	921,8			780,2	0,85
-	0	1	0	0			0,00E+00	0,000		
					5,8	921,8			780,2	0,85
R _{se}			0,04	0,055				0,000		
					4,9	866,9			780,2	0,9
		R _T :	0,73	1	16,1	Z _{kok} :	5,1E+11	1	736,1	

Taulukosta neljätoista näkee myös sen, että bitumisivelyn pintaan tiivistyvä kosteutta (RH-sarakkeen arvo on ylittänyt arvon yksi). Kuukausikeskiarvoilla laskettuna kolmena peräkkäisenä kuukautena loka- ja joulukuun

välillä bitumisivelyn pintaan tiivistyy kosteutta. Tiivistyminen ei ole suurta: lokakuussa alle gramman per neliö kuukauden aikana, marraskuussa noin puolitoista grammaa ja joulukuussa noin 3,3 g/m²/kk. Kolmen kuukauden aikana bitumisivelyn pintaan tiivistyy laskennallisesti noin 5,8 g/m². Tämä kosteus valuu seinän alareunaan painovoimaisesti, koska ilmapöly ilma ei pysty sitomaan sitä, ja aiheuttaa seinän alareunaan lisärasitusta.

Alkuperäisessä seinärakenteessa voi siis olla homevaurio, edellyttäen, että ilma- ja kosteusolosuhteissa on pölyä tai muuta ravintoa mikrobeille sekä verhomuurauksessa ilmavuotoja. Tätä puoltaa myös käytännön havainnot kyseisestä rakennetyypistä. Toisaalta rakenteella on hyvä kuivumiskapasiteetti sisäympäristössä, ja usein vastaavanlaisessa rakenteessa bitumisivelyn on pitänyt pettää ennen suurempaa vauriota.

Liika kosteus betonipilarissa voi vaurioittaa sitä lähinnä nousevan kosteuden osalta. Betonin karbonisoituessa betonin pH ei enää suojaa pilarin terästä, ja tuloksena on usein pilarin reunaterästen korroosiota, joka osaltaan voi lisätä betonin rapautumista.

Alkuperäisen rakenteen riskituloa voidaan pitää seuraavana:

- Kellarin seinärakenne on merkittävä riski, koska vaurio siinä on todennäköinen, mutta vaikutus vähäinen (jos tila ei ole käytössä).
- Toisaalta, jos tila otetaan käyttöön vaikutuksen arvo kasvaa ja samalla riski suurenee.
- Lattian osalta alkuperäinen rakenne toimii niin kauan, kuin vesieristeenä toimiva bitumisively toimii.
- Molempien rakennetyyppien osalta voidaan todeta riskin kasvavan rakenteen ikääntyessä (bitumisivelyn käyttöikä kohteessa on jo ylittetty).

5.1.2 Korjaustapa ja -laajuus

Kapselointikorjaus tehdään epoksipohjaisella kapselointituotteella, joka asennetaan lattian sekä seinän pintaan. Reuna-alueet ja liittymät vahvistetaan sekä tiivistetään valmistajan ohjeen mukaan kaksikomponenttisella vedeneristysmassalla.

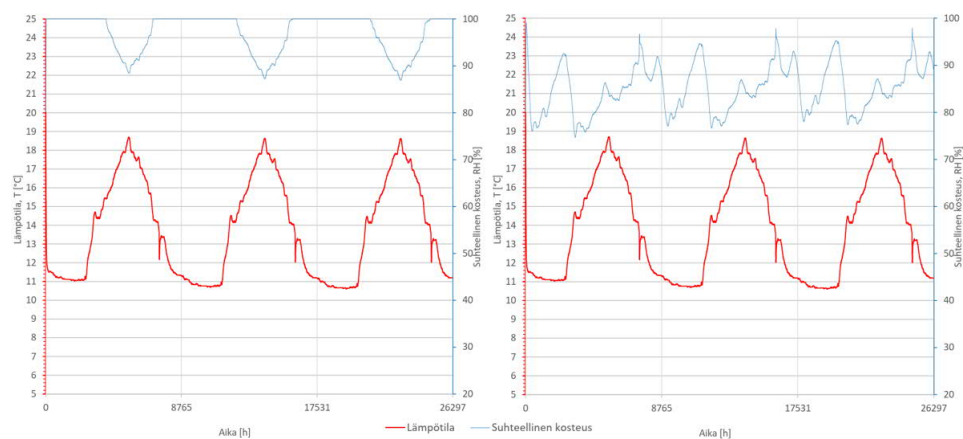
Väliseinän kapselointi ei ole välttämätön, mutta tarkastellaan kuitenkin tilannetta, jossa väliseinäkin kapseloidaan. Pilarin kapselointivaihtoehtoa ei tehdä. Pilariin liitytään kuitenkin samoin kuin reuna-alueisiin, edellämäin tavalla.

5.1.3 Korjaustavan riskien arviointi rakennusfysikaalisen laskennan avulla

Alustavan stationäärilaskennan perusteella alkuperäiseen rakenteeseen tiivistyi kosteutta, kun käytettiin rakennusfysikaalisen testivuoden

Jokioinen 2004 kuukausikeskiarvoja. Kun stationäärilaskentaan lisättiin kapselointi, tiivistymistä ei tapahtunut.

Mallinnuksessa todettiin päinvastaista. Kosteuspitoisuudet nousivat seinän osalla jokaisessa pisteessä verrattuna alkuperäiseen rakenteeseen ilman kapselointia. Alla kuvasta neljäkymmentäyksi voidaan todeta kapseloidun rakenteen olevan tarkastelupisteessä TP-1.04 kondensoituvalla alueella monta kuukautta vuodessa, kun taas alkuperäisessä rakenteessa ei tapahdu kondensoitumista ollenkaan. Kuvassa sininen käyrä kuvaa suhteellista kosteutta. Homeindeksin maksimiarvo kyseisessä pisteessä on kapseloidussa rakenteessa 3,5 ja alkuperäisessä rakenteessa 0,185.



Kuva 41. Kohde A:n tarkastelupisteeseen TP-01.04 tilanne kapseloituna (vasemmalla) ja ilman kapselointia (oikealla).

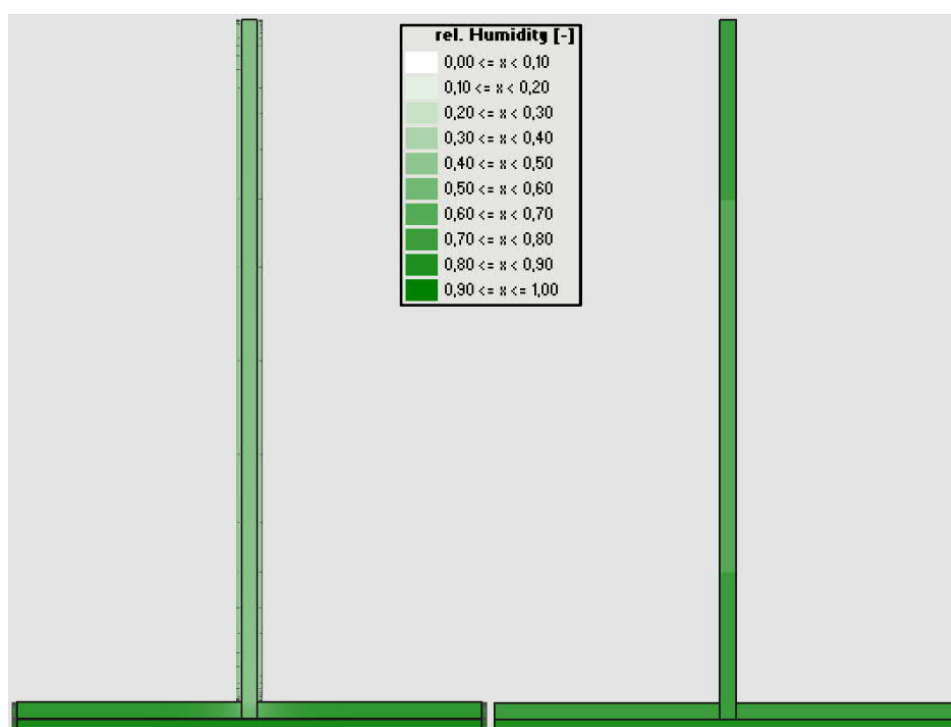
Seinän osalta voidaan todeta suurimman osan tarkastelupisteistä olevan kapseloidussakin rakenteessa kosteat, mutta näiden tarkastelupisteiden homeindeksit ovat pysyneet alle yhden, joka määritettiin rajaksi kyseiselle arvolle. Kuitenkin kaikkien riskipaikkojen homeindeksit nousivat mallinnuksessa korkealle. Tähän on erityisesti vaikuttanut kapselointi, joka näissä mallinuksissa on ollut 1 mm kerroksena tarkasteltuna tiiviimpi kuin bitumisively (vrt. $\mu_{\text{epoksi}} = 128800$ ja $\mu_{\text{bitumi}} = 75000$).

Taulukossa viisitoista on esitetty simuloinnin lopputulokset ja analysoitune. Punaisella katkoviivalla on esitetty tarkastelupisteet, joiden homeindeksi on kohonnut yli määritetyn tason ($M_{\text{max}}=1$). 1D-mallinnuksen kuvaajat ja tulokset on kapseloidun rakenteen osalta tarkasteltavissa liitteessä 9.

Simuloinneissa tarkasteltiin myös tilannetta, jossa väliseinä kapseloitiin kokonaan (TP-1.13_Ver2 ja TP-1.15_Ver2). Kuvasta neljäkymmentäkaksi voidaan kuitenkin päätellä tapauksen, jossa seinän alueella ei ollut kapselointia, vaikuttavan laatan kuivumiseen vain paikallisesti.

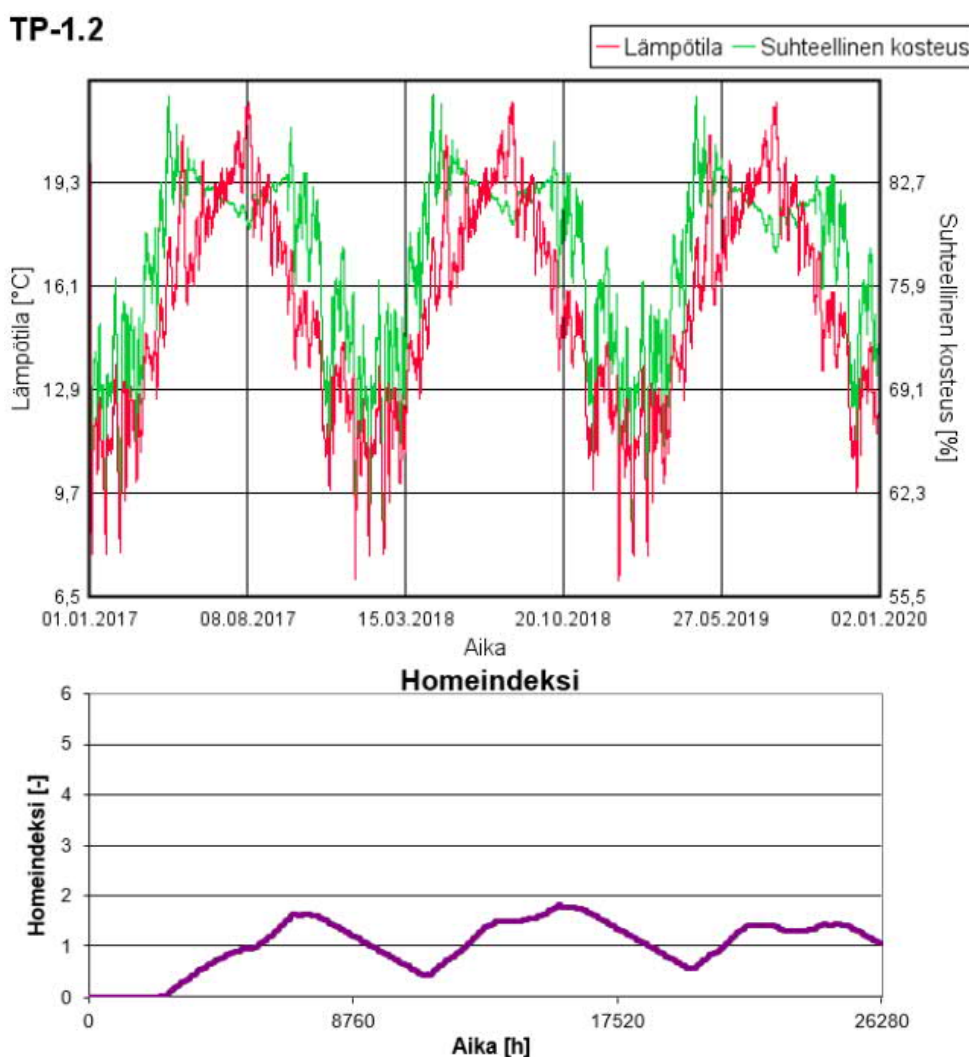
Taulukko 15. Kohde A:n simulointien keskimääräiset tulokset kerättynä ja analysoituna kolmen vuoden simuloinnin jälkeen (lopputilanne).

Tarkastelu-piste	Lämpötila [°C]	RH [%]	Kosteuskäyrän suunta	Wufi-malli	Materiaalit tarkastelupisteessä (luettuna ulkoa sisäänpäin)
TP-1.01	6,7	100	nouseva	1D	betoni ja bitumisively
TP-1.02	12	70	nouseva	1D	ilmarako, tiilen pinta
TP-1.03	16	55	nouseva	1D	tiili ja kapselointi
TP-1.04	11	100	tasainen	1D	betoni ja bitumisively
TP-1.05	15	79	laskeva	1D	ilmarako, tiilen pinta
TP-1.06	18	66	laskeva	1D	tiili ja kapselointi
TP-1.07	16	91	tasainen	1D	betoni ja bitumisively
TP-1.08	18	81	tasainen	1D	ilmarako, tiilen pinta
TP-1.09	19,5	75	tasainen	1D	tiili ja kapselointi
TP-1.10	19,3	100	tasainen	1D	alempi bet.laatta yp.
TP-1.11	19,3	83	nouseva	1D	ylempi bet.laatta ap.
TP-1.12	19,6	82	nouseva	1D	bet. ja kapselointi ap.
TP-1.13	21	54	laskeva	2D	VS ylälaatan korkeus
Ver. 2	21	77	laskeva	2D	- Ver.2 VS-kapseloitu -
TP-1.14	21	86	nouseva	2D	Pilari ylälaat. korkeus
TP-1.15	21	48	laskeva	2D	VS 300 mm korkeus
Ver. 2	21	71	laskeva	2D	- Ver.2 VS-kapseloitu -
TP-1.16	20	77	laskeva	2D	Pilari 300 mm korkeus



Kuva 42. Tiiliväliseinän ja alapohjalaatan suhteellinen kosteus simuloinnin lopussa. Vasemman puoleisessa simuloinnissa ei ole kapselointia seinän pinnassa ja oikean puoleisessa on.

Taulukossa kuusitoista on ulkoseinärakenteen tarkastelupisteiden homeindeksitarkastelut eri tilanteissa. Tarkastelut on tehty samoilla lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoilla kuin 2D-simuloinnin adiabaattisen reunan vieressä, mikä ei aivan vastaa todellista tilannetta, koska kosteus tasaantuu myös välipohjatäytteisiin, betoniseen alalaattaan sekä mahdollisesti tuulettuu sisäilmaan ilmapuotojen kautta, mutta silti ilmaisee selvästi riskin mikrobikasvusta orgaanisen aineksen ollessa kellarin katon välipohjatäytteenä. Taulukon homeindeksitarkastelut on tehty alkuperäisissä tarkastelupisteissä 1.1–1.3, betonin ja orgaanisen täytteen rajalla (HHL1 – HHL3) ja orgaanisessa täytteenä itsessään (HHL1 – HHL1).



Kuva 43. Tarkastelupisteen 1.2 lämpö- ja kosteuskuvaaja sekä homeindeksin kuvaaja orgaanisessa materiaalissa kolmen vuoden simuloinnin aikana (2D-simulointi).

Taulukosta kuusitoista näkee myös tarkastelupisteen 1.02 olevan ainoa, joka ylittää homeindeksin arvon 1, mutta vain orgaanisessa täytössä itsessään. Kyseinen tarkastelupiste sijaitsee ilmapölyssä verhomuurauksen ulkopinnassa. Kuvassa neljäkymmentäkolme on esitetty homeindeksin

kehittyminen kolmen vuoden ajanjakson ajalta tarkastelupisteessä 2 luokassa HHL1.

Taulukko 16. Tarkastelupisteiden 1.1–1.3 homeindeksin arvot eri homeh-
tumisherkkyysluokissa (A = alkuperäinen, R =betonin ja orgaanisen
täytteen rajalla, O = orgaanisessa täytteessä) 2D-simuloinnin
perusteella

Tarkaste- lupiste	kasvuno- peuden herkkyys- luokka	Homeen mak- simimäärän herkkyys- luokka	Taantuma- luokka [C _{mat}]	Maksimi- homeindeksi [M]
TP-1.1 (A)	HHL3	HHL3	0,1	0
TP-1.1 (R)	HHL1	HHL3	0,5	0,36
TP-1.1 (O)	HHL1	HHL1	0,5	0,898
TP-1.2 (A)	HHL3	HHL3	0,1	0,004
TP-1.2 (R)	HHL1	HHL3	0,5	0,573
TP-1.2 (O)	HHL1	HHL1	0,5	1,818
TP-1.3 (A)	HHL3	HHL3	0,1	0
TP-1.3 (R)	HHL1	HHL3	0,5	0,006
TP-1.3 (O)	HHL1	HHL1	0,5	0,048

5.1.4 Korjauksen riskien toteutuvuuden arviointi

Lämpö- ja kosteusteknisen simuloinnin perusteella kosteus liikkui oletetusti rakenteissa sekä niiden liittymissä. Kellarin seinärakenteen yläreunan kosteus pysyi korkealla tasolla koko simuloinnin ajan, ja alustavan riskiarvion toteutuneina riskeinä voidaan todeta bitumisivelyn pintaan tiivistynyt kosteus ilmaraoissa.

Wufi laskee ilmaraon kokonaiskosteuspitoisuuden, mutta se ei ota huomioon painovoimaisesti siirtyvää kosteutta eikä laske oikein tiivistyvän kosteuden määrää. Ilmakerrokselle on määritely vain kosteuskuvaaja suhteellisen kosteuden 0–100 % välillä. Jos kosteuspitoisuus ylittää kyseisen alueen, Wufi käyttää sisäistä kapillaarisuuskuvaajaa, kun materiaalille ei ole sitä erikseen määritely ja samalla näyttää absoluuttisen kosteuspitoisuuden liian suurena. (WUFI 2013).

Tarkastelupisteisiin 1.01 ja 1.04 tiivistyvä vesi valuu painovoiman vaikutuksesta alaspäin, jolloin se luo ylimääräisen kosteusrasituksen tarkastelupisteisiin 1.07, 1.08 ja 1.09. Tätä ei otettu huomioon mallinnuksissa.

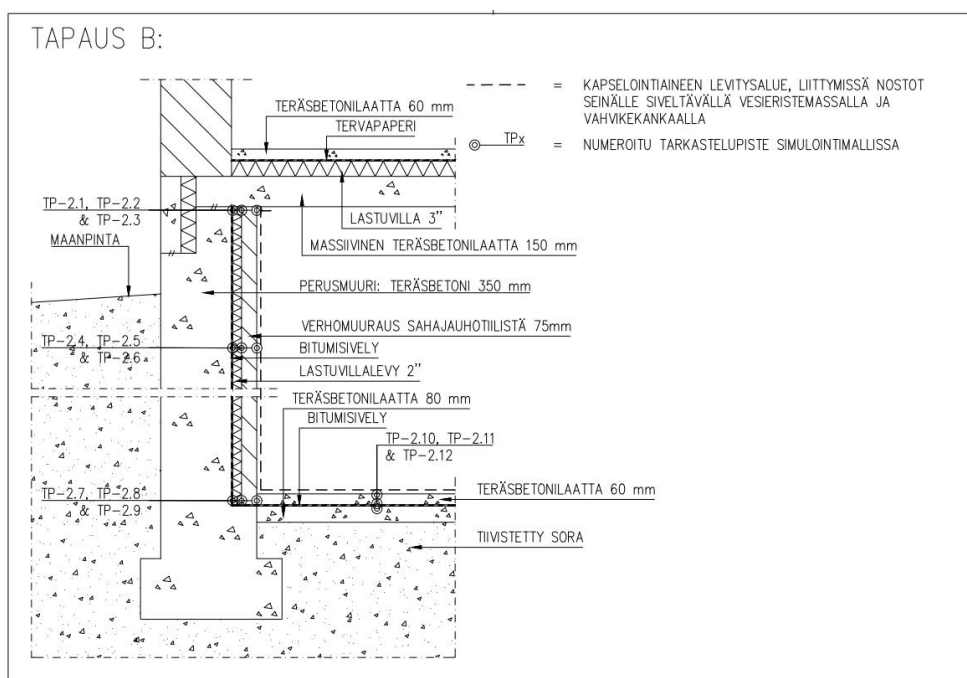
Kosteuden muita rakenteita turmelevaa vaikutusta ei ollut kuitenkaan mahdollista mallintaa. Suuri kosteuspitoisuus saattaa vaikuttaa erityisesti vanhan tiiliverhousmuurauksen ja kapselointiaineen keskinäiseen tartuntaan ja siten korjauksen pitkäaikaiskestävyyteen. Sama ongelma voi tulla kyseeseen myös pilarin juuren osalta, jos kosteuskuormitus kasvaa liian

suureksi. Tämä on erityisesti riskinä kapillaarisen kosteuden ollessa kyseessä.

Lattiarakenteen kapselointikorjauksen voidaan olettaa toimivan paremmin kuin kellarin seinän. Tämä johtuu näkemykseni mukaan siitä, että kapseloinnin tartunnalla on paremmat edellytykset kiinnipysymiseen kuin seinän tiilen pinnassa. Kosteuskäyrän nousu on noin prosentin luokkaa vuodessa, ja kapseloinnin alapinnassa kosteus liikkuu noin 80 % suhteellisen kosteuden arvoissa, joten lattiassakin kosteuspitoisuus nousee, mutta mallilliseen tahtiin. Kuitenkin ylimääräinen kosteus lisää aina riskiä kapseloinnin tartunnan pettämisestä.

5.2 Kohde B

Tutkittava kohde on saman aikakauden rakennus kuin kohde A. Eli kohde on tyypillinen 1940 – 1960 -lukujen kerrostalojen maanvastainen kellarirakenne, jossa vedeneristeenä käytetyssä kivihiilipiessä tai bitumisiveilyssä on usein haihtuvia yhdisteitä haitallisissa määrin (Komulainen, J., Huttunen, J. & Säntti, J. 2010, 101; Neuvonen 2006, 133).



Kuva 44. Kohde B:n rakenneleikkaus (kuva isompana liitteessä 1).

Rakenne erottuu tapauksesta A siten, että ilmaraon tilalla on lastuvillariste ja sokkelin osalla on osittain sokkelihalkaisu. Kuvassa neljäkymmentäneljä on esitetty simuloitavan tapauksen periaatteellinen rakenneleikkaus. Kuvassa on esitetty myös tarkastelupisteet simulointimallissa.

5.2.1 Alkuperäisen rakenteen riskianalyysi

Massiivisen betonirakenteen kosteusriski kasvaa sisäpuolisen lämmöneristyksen takia erityisesti ulkoilmaa vasten olevien rakenteiden osalta. Se eristää massiivirakenteen lämpimämmästä sisäilmasta ja siten nostaa huokosilman suhteellista kosteutta rakenteen kylmentyessä.

Kuten aiemmin mainittiin, tapauksen B rakenne otettiin mukaan tutkimukseen sen vertailumahdollisuuden takia. Heiskanen (2016, 44) totesi, että vastaavassa rakenteessa bitumisivelyn ja lastuvillalevyn rajapinnassa tapahtuu laskennallisesti homeen muodostumista ja homeindeksi kohosi yli arvon viisi ulkoilmaa vasten olevan rakenteen bitumisivelyn pinnassa.

Tapauksen B alkuperäisten rakenteiden riskituloa voidaan pitää samana kuin tapauksessa A. Toisaalta seinän kosteusvaurion todennäköisyyttä voidaan pitää lähes varmana em. seikkojen takia, jolloin seinän riskitulona olisi sietämätön riski.

Tässä tapauksessa kapselointi voisi toimia myös tiivistyskorjauksena todennäköistä mikrobivauriota vastaan.

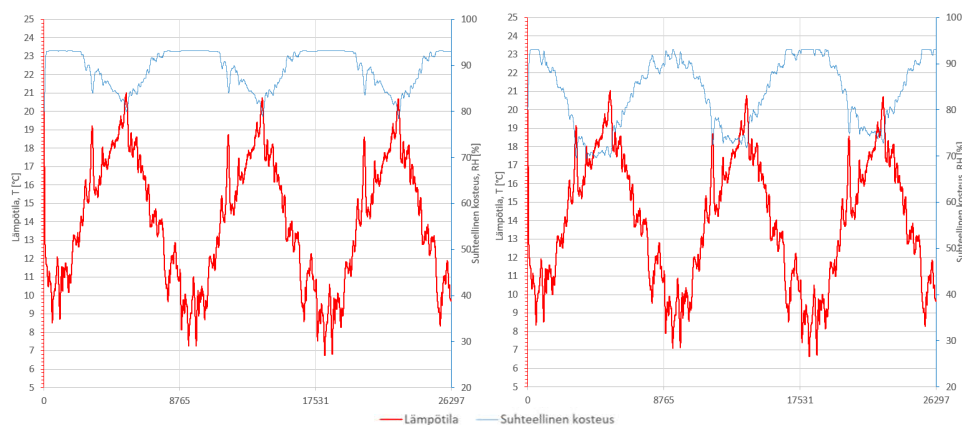
5.2.2 Korjaustapa ja -laajuus

Rakenteiden samankaltaisuudesta johtuen korjaustapa on identtinen tapauksen A kanssa. Eli kapselointikorjaus tehdään epoksipohjaisella kapselointituotteella, joka asennetaan lattiaan sekä seinään. Reuna-alueet ja liittymät vahvistetaan sekä tiivistetään, kuten on edellä mainittu.

5.2.3 Korjaustavan riskien arviointi rakennusfysikaalisen laskennan avulla

Tapauksen B lattiarakenne on identtinen A-tapauksen lattiarakenteen kanssa, joten sitä ei analysoida tässä enää uudestaan. Kosteuspitoisuudet nousivat seinän osalla ulkoilmaa vasten olevan rakenteen osalta, verrattuna alkuperäiseen rakenteeseen ilman kapselointia.

Maanvastaisten osien osalta alkuperäinen rakenne toimii paremmin. Kuvasta neljäkymmentäviisi voidaan todeta kapseloidun rakenteen olevan tarkastelupisteessä TP-2.01 kosteampi kuin alkuperäinen rakenne. Kuvassa sininen käyrä kuvaa suhteellista kosteutta. Homeindeksin maksimiarvo kyseisessä pisteessä on kapseloidussa rakenteessa noin 0,6 ja alkuperäisessä rakenteessa noin 0,4. Tämän voidaan olettaa johtuvan siitä, että rakenne pääsee kuivumaan sisäänpäin lämpötilan noustessa. Kosteushuiput pysyttelevät samalla tasolla molemmissa rakenteissa bitumisivelyn ja lastuvillalevyn välillä.



Kuva 45. Kohde B:n tarkastelupisteen TP-02.01 tilanne kapseloituna (vasemmalla) ja ilman kapselointia (oikealla), 1D-simuloinnin perusteella.

Taulukossa seitsemäntoista on esitetty simuloinnin lopputulokset ja analysoitu ne. Punaisella katkoviivalla on esitetty tarkastelupisteet, joiden hoimeindeksi on kohonnut yli määritetyn tason ($M_{max}=1$). 1D-mallinnuksen kuvaajat ja tulokset on kapseloitun rakenteen osalta tarkasteltavissa liitteessä 9.

Taulukko 17. Kohde B:n simulointien keskimääräiset tulokset kerättynä ja analysoituna kolmen vuoden simuloinnin jälkeen (lopputilanne).

Tarkastelupiste	Lämpötila [°C]	RH [%]	Kosteuskäyrän suunta	Wufimalli	Materiaalit tarkastelupisteessä (luettuna ulkoa sisäänpäin)
TP-2.01	9,7	93	tasainen	1D	bitumi+ lastuvillalevy
TP-2.01	3,4	97	laskeva	2D	ylemmän versio 2D
TP-2.02	19	55	laskeva	1D	lastuvillalevy + tiili
TP-2.02	17,2	43	laskeva	2D	ylemmän versio 2D
TP-2.03	20	53	laskeva	1D	tiili + kapselointiepoksi
TP-2.03	16	55	nouseva	2D	ylemmän versio 2D
TP-2.04	6,8	94	tasainen	1D	bitumi+ lastuvillalevy
TP-2.05	18,5	49	tasainen	1D	lastuvillalevy + tiili
TP-2.06	19,7	45	tasainen	1D	tiili + kapselointiepoksi
TP-2.07	13,5	93	tasainen	1D	bitumi+ lastuvillalevy
TP-2.08	19,6	65,2	tasainen	1D	lastuvillalevy + tiili
TP-2.09	20,3	63	tasainen	1D	tiili ja kapselointi
TP-2.10	19,4	100	tasainen	1D	alempi bet.laatta yp.
TP-2.11	19,4	83	nouseva	1D	ylempi bet.laatta ap.
TP-2.12	19,6	82	nouseva	1D/2D	bet. ja kapselointi ap.

Osa tuloksista on esitetty 2D-simuloinnin osalta vertailuarvoina. 2D-simuloinnin lämpötilat ovat pienempiä, ja siten nostavat suhteellisen kosteuden arvoja. 1D-laskennassa on huomioitu vain sokkelihalkaisun alue, mutta sokkelihalkaisun korkeus on kohtuullisen matala, jolloin se sallii rakenteen

jäähtymisen eristämättömän rakenteen sivutiesiirtymänä, kuten voidaan todeta kuvasta kaksikymmentähdeksän.

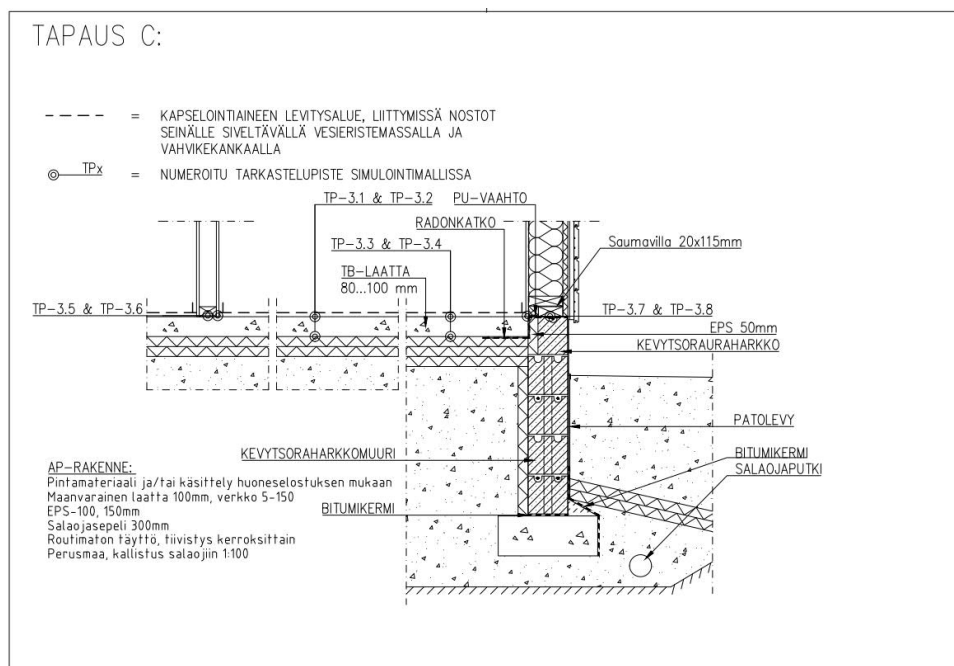
5.2.4 Riskien toteutuvuuden arviointi

Yhteenvedona voidaan todeta kapselointikorjauksen parantavan tapauksen B kellarin seinärakenteen kosteusteknistä toimivuutta. Ainakin rakenteen ollessa maata vasten, ulkoilmaa vasten kellarin seinärakenteen kosteustekninen toiminta heikkenee. Kuitenkin molemmissa tilanteissa rakenteessa on edellytykset homeen kasvulle vastaavissa kohdissa kuin A-tapauksessakin. B-tapauksessa on mikrobeille enemmän ravintoa lastuvilla-levyn muodossa.

Lattiarakennetta ei analysoida tässä yhteydessä tarkemmin, koska se on identtinen A-tapauksen lattiarakenteen kanssa. Myös kosteuden mekaanisen rasittavuuden ongelmat ovat vastaavia tapauksen A kanssa, liittyen esim. kapselointiaineen tartuntaan. Suhteellisen kosteuden arvot ovat B-tapauksen seinärakenteessa selkeästi A-tapausta pienemmät, joten kapseloinnin tartunnan pettäminen on teoriassa pienempi.

5.3 Tapaus C

Tapauksessa C on kyseessä 2000-luvun alun päiväkotirakennus, jossa muovimatot on asennettu liian kostean betonin pintaan. Kohteen alapohjalaatta on vaurioitunut vanhan mattoliiman reaktiotuotteista, ja betoniin on imeytynyt yhdisteitä, joista emittoituu ilmaan VOC-yhdisteitä.



Kuva 46. Kohde C:n rakenneleikkaus (kuva isompana liitteessä 1)

Kohde C:n rakenneleikkaus on esitetty kuvassa neljäkymmentäkuusi. Rakenteessa on alapuolelta eristetty betonilaatta, kevytsoraharkkoperustus sekä puurakenteinen väli- ja ulkoseinä. Tapauksessa tutkitaan puualajuoksuksen mahdollista homehtumista laatan pinnassa. Oletetaan, että niissä ei ole aiempia mikrobivaurioita ja sisäseinän alla ei ole erotuskaistaa.

5.3.1 Alkuperäisen rakenteen riskianalyysi

Tapauksen C perusrakenne on todettu toimivaksi, ja sitä käytetään monin paikoin vieläkin. Rakenteen riskit perustuvatkin sen pinnoittamiseen ja sen ajankohtaan. Luvussa 2.3.4 on esitetty rakenteen pinnoittamisen virheet, joita tapauksessa korjataan. Toisin sanoen rakenteen riskit perustuvat pinnoittamisen ja käytön aikaisiin riskeihin.

Alkuperäisen rakenteen riskitulona voidaan pitää seuraavaa:

- Lattiarakenteen vaurioitumisen todennäköisyytenä voidaan pitää mahdollisena ja vaikutuksia kohtalaisina, tällöin riski tulee huomioida.
- Vaikutuksia voi pitää myös merkittävinä, jos ajatellaan taloudellisia menetyksiä, jolloin riskistä tulee ”merkittävä”.
- Rakenteen vaurioitumisen tulevat riskit liittyvät käyttäjästä aiheutuvaan virheelliseen käyttöön (esim. siivouksen osalta) tai äkilliseen vaurioitilanteeseen (esim. putkivuotoon).

5.3.2 Korjaustapa ja -laajuus

Korjausmenetelmäksi on valikoitunut kapselointikorjaus alapohjalaatan osalta siten, että vaurioitunut pintarakenne puretaan ja irtoaines hiotaan betonipinnalle. Reuna-alueet ja liittymät vahvistetaan kaksikomponenttillä vedeneristysmassalla kipsilevyn pintaan.

5.3.3 Korjaustavan riskien arviointi rakennusfysikaalisen laskennan avulla

Kapseloinnin jälkeen rakenne kuivuu hitaammin, niin kuin oletettiin. Kuitenkin homeindeksi pysyi nollassa kaikissa tarkastelupisteissä, poissulkien ulkoseinän bitumin ja alaohjauspuun välisen tarkastelupisteen.

Rakenteen voidaan todeta toimivan rakennusfysikaalisesti myös kapselointikorjauksen jälkeen. Mallinnuksessa jätettiin kapselointikorjaus mallintamatta väliseinän ja ulkoseinän kipsilevyn kohdilta, jotta voitiin arvioida riskiä alemman homehtumisherkkyyden tuotteille nousevan kosteuden osalta.

Taulukossa kahdeksantoista on esitetty mallinnusten tuloksia. Analysoinnissa on käytetty sekä 1D että 2D laskentaa. Suuret erot lämpötiloissa 1D ja 2D versioiden välillä johtuvat 2D-mallinnuksessa olleesta virheellisestä maanvastaisen rakenteen pintavastuksen arvosta. Pintavastukseksi, R_{se} ,

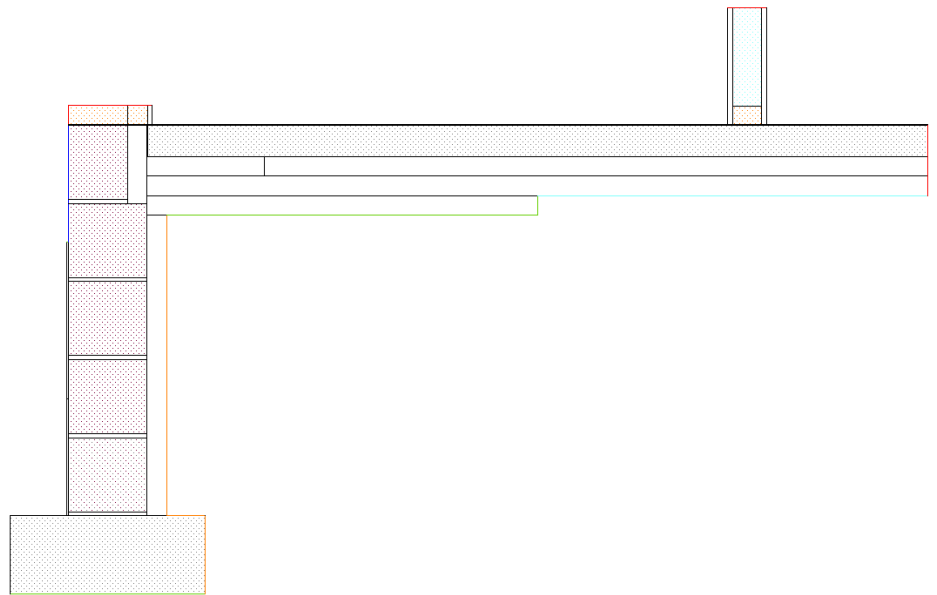
määriteltiin nolla, kun se olisi pitänyt 2D-laskennassa olla luvun käänteisluku eli lämmönläpäisykerroin. Virheeksi siis muodostui se, että rakenteen maanvastaisen pinnan läpi ei liikkunut lämpöenergiaa ollenkaan. Tämä lämmitti rakennetta osaltaan ja sitä kautta vaikutti suhteellisen kosteuden arvoihin. Tapauksessa C tästä ei muodostunut suurta virhettä lopputulokseen ja virheestä huolimatta homeindeksin arvot jäivät selkeästi alle arvon yksi.

Taulukko 18. Tapauksen C:n simulointien keskimääräiset tulokset kerättyinä ja analysoituna kolmen vuoden simuloinnin jälkeen lopputilanne.

Tarkastelu-piste	Lämpötila [°C]	RH [%]	Kosteuskäyrän suunta	Wufi-malli	Materiaalit tarkastelupisteessä (luettuna ulkoa sisäänpäin)
TP-3.01	21	49	laskeva	2D	EPS + betoni
TP-3.01	14,8	71	laskeva	1D	ylemmän versio 1D
TP-3.02	21	51	laskeva	2D	betoni + kapselointi
TP-3.02	20,6	53	laskeva	1D	ylemmän versio 1D
TP-3.03	21	48	laskeva	2D	EPS + betoni
TP-3.03	15	65	laskeva	1D	ylemmän versio 1D
TP-3.04	21	53	laskeva	2D	betoni + kapselointi
TP-3.04	20	53	laskeva	1D	ylemmän versio 1D
TP-3.05	21	52	laskeva	2D	betoni + alaohjauspuu
TP-3.06	21	47	tasainen	2D	betoni + kipsilevy
TP-3.07	19	53	tasainen	2D	betoni + kipsilevy
TP-3.08	3	90	nouseva	2D	bitumi + alaohjauspuu

5.3.4 Riskien toteutuvuuden arviointi

Tapauksen C rakennusfysikaalisessa mallinnuksessa arvioidut riskit eivät pääosin toteutuneet, ja rakenteen voidaan todeta toimivan hyvin. Kun kapselointikorjaus tehdään kipsilevyn päälle, on teoreettinen mahdollisuus, että VOC-yhdisteet pääsevät kipsilevyn kautta sisäilmaan. Tässä tapauksessa päätettiin jättää kapselointikorjaus kipsilevyn päälle, jotta voitaisiin arvioida kosteusrasitusta myös kipsilevylle. Toisaalta kosteusrasitusta väliseinän alaohjauspuun osalta olisi voinut myös suurentaa liittämällä kapseloinnin suoraan puuhun.



Kuva 47. 2D-simulointimalli, tapaus C.

Tarkastelupisteen 3.08 kohdalla tulos on hiukan harhaanjohtava, koska simuloinnissa ulkoseinää ei mallinnettu kokonaan ja alaohjauspuun kaksi sivua on määritetty adiabaattisiksi. Toisin sanoen niiden reunojen kautta ei tapahdu lämmön- eikä kosteuden siirtymistä. Kuvasta viisikymmentä on nähtävissä simulointimallin adiabaattiset reunat punaisella värillä merkityinä. Todellisuudessa alaohjauspuu pääsee kuivumaan seinärakenteeseen, joten jos seinärakenteella on kuivumiskapasiteettia, tarkastelupisteen riski homekasvustolle on selvästi pienempi. Tässä laskennassa kyseisen tarkastelupisteen homeindeksin arvoksi tuli noin 1,6.

6 TAPAUSTUTKIMUSTEN YHTEENVETO

Rakennusfysikaaliset simulointimallit toimivat pääosin odotetulla tavalla, tai niiden erot olettamuksiin verrattuna olivat pääteltävissä lämpö- ja kosteuskuvaajista. Perustelut tähän on esitetty tapaustutkimusten yhteydessä.

Laskentamalleissa ei ole huomioitu maan kapillaarisuutta eikä vajovesiä, ja siten simulointi antaa osittain positiivisemmän kuvan kuin todellisuus. Simuloinnin tuloksena on silti havaittavissa riski mikrobikasvustoon, kun kapseloitavat maanvastaiset rakenteet liittyvät homehtumisherkkiin rakenteisiin, mutta vain silloin kun kyseessä on jo valmiiksi riskialtis rakenne, jossa on suuri kosteusrasitus.

Rakennusfysikaalisissa simuloinneissa on myös oletettu bitumisivelyn olevan kokonaisuudessaan ehjä. Jos sivelykerroksessa on vaurioita, vaikuttaa se merkittävästi alapohjarakenteen toimintaan. Ennen kapselointikorjauksia tulisikin varmistua bitumikerroksen eheydestä esimerkiksi kuntotutkimuksella ja kosteusmittauksin, jolloin voidaan arvioida kapselointikorjauksen soveltuvuutta juuri kyseiseen kohteeseen.

Muita tapaustutkimusten yhteydessä mainitsemattomia, kaikille rakenteille yhteisiä onnistumisen vaarantavia riskejä, on rakenteen painumat ja sitä kautta halkeamat.

Jos maanvastaisten rakenteiden korjaussuunnittelussa päädytään kapselointikorjaukseen, olisi suositeltavaa varmentaa rakenteen kosteuskäyttäytymistä jatkuvatoimisella kosteus- ja lämpömittauksella. Tällöin voidaan verrata mittaamalla suunniteltuihin oletuksiin. Tämä on oleellista varsinkin pitempiaikaisessa korjauksessa.

Tapaustutkimusten tuloksista voidaan vetää yhteenveto, että kapselointikorjaus voi toimia myös hyvin maanvastaisessa rakenteessa, kun rakenne on itsessään toimiva. Toisin sanoen lämmöneristeen tulisi olla maata vasten asennettu ja toimia jonkinasteisena diffuusiovastuksena maasta siirtävää kosteutta vastaan.

Kapselointikorjaus voi parantaa myös sellaisten rakenteiden toimivuutta, joissa sisäilma tiivistyy rakenteeseen, mutta jos rakenne kuivuu sisäänpäin, niin silloin kapselointikorjaus ei välttämättä toimi hyvin.

Siirtävänä korjauksena on vaikea arvioida kapselointikorjaukselle käyttöikää, koska se riippuu kapseloitavan rakenteen kunnosta. Kunto voidaan tietenkin selvittää, ja suosituksena olisi, ettei ainakaan jo valmiiksi rapautuneen rakenteen päälle asenneta kapselointia. Eli rakenteen kunto tulisi selvittää vetokokein.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyössä perehdyttiin maanvastaisten rakenteiden rakennusfysikaaliseen toimintaan ja kehitettiin tapa määrittää maanvastaisten rakenteiden tarkemmat simulointiolosuhteet. Aiemmin on käytetty stationääriin laskentaan määriteltyjä arvoja, joiden voi ajatella olevan varmalla puolella, mikä voidaan todeta myös tehtyjen vertailusimulointien perusteella. Maanvastaisten rakenteiden simulointi vie paljon aikaa ja laskentatehoa tietokoneelta.

Epästationäärisellä laskentatavalla saadaan kuitenkin parempi käsitys kosteuselämisestä koko rakenteen alueella eri vuodenaikoina. Kapselointikorjauksen yhteydessä pitää kuitenkin arvioida, vaikuttaako liika kosteus esimerkiksi kapselointituotteen pysyvyyteen asennetun tuotteen pinnalla.

Simulointi antaa myös kohtuullisen varmalla puolella olevan ennusteen rakenteen toiminnasta, kun merkittäviä lisäkosteuslähteitä ei ole, joten työssä esitetyt menetelmät soveltuvat hyvin muidenkin maanvastaisten rakenteiden toimivuuden arviointiin. Työssä käytetty kolmen vuoden simulointiaika on varmalla puolella, mutta myös pidempää laskenta-aikaa on mahdollista ja joskus suositeltava käyttää. Yleensä olisi hyvä saada laskennassa aikaan ns. tasainen tai laskeva kosteuskäyrä, joka tarkoittaa sitä, että kosteuskäyrän vuosittaiset huiput laskevat tai pysyvät samassa arvossa vuodesta toiseen.

Maanvastaisten rakenteiden lämpö- ja kosteustekninen rakennusfysikaalinen simulointi vaatii vielä lisätarkennusta ns. maanvastaisen ilmastodatan luomisessa. Tarkkuuden parantaminen vaatisi myös erilaisten maatäyttöjen luomista materiaalikirjastoon, jotta maaperän kapillaarisuus ja vajovedet voitaisiin ottaa laskennassa huomioon. Wufi:n tietokannasta löytyy muutamia maalajeja, mutta ei kattavasti. Laskentamallin kasvaessa on myös ongelmana kohonnut laskentateho ja -aika, joka nousee merkittävästi mallin koon kasvaessa.

Simuloinnit tehtiin opinnäytteessä 1D- ja 2D-mallintamalla. Käyttämällä 1D-mallinnusta voitaisiin saada tehokkuutta ja nopeutta mallinnuksiin, mutta silloin rakenneliittymät jäivät tarkastelematta. Tarkastelluista rakenteista voisi tehdä vielä 1D-simuloinnit ja verrata niitä 2D-simulointiin. Siten voitaisiin verrata liittymän kautta siirtyvää kosteuden määrää ja varmentaa, soveltuvatko 1D-tarkastelut maanvastaisten rakenteiden simulointiin.

Rakennusfysikaalisten mallinnusten työskentelyprosessina tämän opinnäytteen perusteella kannattaa tehdä siten, että käytetään ensin 1D-mallinnuksia suunnittelun alkuvaiheessa stationäärilaskennan ohella ja siirrytään 2D-laskentaan vasta sitten, kun lisätään laskennan tarkkuustasoa tai

kun todetaan kyseessä olevan erikoistilanne, jota ei pysty ratkaisemaan 1D-ohjelmalla.

Näin toimimalla pystytään myös rajaamaan käyttäjävirheitä mallinnuksessa, kun käytetään useampaa laskentatyökalua ja sen lisäksi verrataan tuloksia toisiinsa, sekä analysoidaan niitä. Em. tavalla edettäessä voidaan myös rajata toimimattomat suunnitteluvaihtoehdot heti alkuvaiheessa pois.

Tämän työn 2D-simuloinneissa huomattiin olevan virhe kohtalaisen myöhäisessä vaiheessa. Tämä ajatusvirhe, sen syyt sekä seuraukset on kuvattu luvussa 5.3.3. Virhe toimii esimerkkinä siitä, että yksi arvo voi muuttaa laskennallisen tarkastelun luonteen täysin. 2D-simulointeja ei toteutettu uudestaan, vaan niiden tuloksia vertailtiin muunnoskaavojen avulla 1D-laskentatuloksiin.

Käytettävän kapselointiaineen vesihöyrynvastukseen tulisi kiinnittää erityistä huomiota sekä saada tutkittua tietoa valmistajalta aineen ominaisuuksista. Kapselointiaineen pinnalle asennettavan tuotteen tulisi olla pienempi vesihöyrynvastukseltaan kuin kapselointiaine, jotta pintarakenteella olisi edellytykset kuivua. Jos kellarin pintamateriaalina halutaan käyttää esimerkiksi muovimattoa, on ohjenuorana hyvä käyttää kuvassa kymmenen esitettyä läpäisevän pintamateriaalin arvon alittavaa tuotetta.

Kapselointikorjauksen tekemällä voi aiheuttaa rakenteen lisävaurioita, mutta se soveltuu silti myös pitkäikäisiin maanvastaisten rakenteiden korjauksiin, kun varmistutaan rakenteen rakennusfysikaalisesta toiminnasta. Joissain tapauksissa esimerkiksi rakenteen alipaineistaminen voi tuoda säästöä joko korvaavana tai kapselointikorjausta täydentävänä korjausmenetelmänä. Maanvastaisen kapselointikorjauksen suunnittelussa kannattaa ottaa luvussa 4.4 esitetyt menetelmät käyttöön minimimenettelynä, ja jos liittymien kosteudet ovat koholla, kannattaa mallintaa myös esim. välipohja liittymät 2D-ohjelmalla.

Opinnäyteaihe on ollut kokonaisuudessaan mielenkiintoinen ja laaja. Mahdollisia jatkotutkimuksia aihepiiristä voisi olla tarkemman riskimatriisin kehittäminen maanvastaisille rakenteille, rakennusfysikaalisten maalajien arvojen selvittäminen ja kapillaarisuuden määrittäminen ilmastotiedostoon.

LÄHTEET

Aronen, H. (2017a). Maanvaraisen laatan kapselointikorjauksen rakennusfysikaalinen toimivuus ja korjauksen vaikutus liittyviin rakenteisiin. Teoksessa Vinha, J. & Kivioja, H. (toim.) Rakennusfysiikka 2017, Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut, Osa 1. Tampere: Juvenes Print - Suomen Yliopistopaino Oy, 83–90.

Aronen, H. (2017b). Maanvaraisen laatan kapselointikorjauksen rakennusfysikaalinen toimivuus ja korjauksen vaikutus liittyviin rakenteisiin. Seminaariluento Rakennusfysiikka 2017 -seminaarissa, 24.10.2017.

Björkholtz, D. (2004). Lämpö ja kosteus, rakennusfysiikka. 3. painos. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Douben, P. (2003). PAHs: An Ecotoxicological Perspective. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.

Guo, Z., Sparks, L., Tichenor, B. & Chang, J. 1998. Predicting the emissions of individual VOCs from petroleum-based indoor coatings. Atmospheric Environment 32, 231–237.

Grantén, J. (2015). Spärrskikt mot golvemissioner – tester av åtgärdseffekten. Bygg & Teknik 5/2015, 37–41. Haettu 9.12.2018 osoitteesta <https://issuu.com/byggteknikforlaget/docs/5-15/53>

Grantén, J. & Vestman, R. (2015). Spärrskikt mot golvemissioner. Tutkimuksen loppuraportti. Haettu 9.12.2018 osoitteesta <http://vpp.sbuf.se/Public/Documents/ProjectDocuments/c99b0315-fa39-47ac-875c-3f144f460442/FinalReport/SBUF%2012890%20Slutrapport%20Sp%C3%A4rrskikt%20mot%20golvemissioner.pdf>

Haila, K. & Vuorela, M. (2016). Kosteus- ja homealkoot ohjelman elinkaaranalyysi. Teoksessa Säteri, J & Ahola, M (toim.) Sisäilmayhdistysraportti 34, Sisäilmastoseminaari 2016. Juva: Bookwell, 19 – 24.

Heikkilä, A.-M., Murtonen, M., Nissilä, M., Virolainen, K. & Hämäläinen, P. (2007). Riskianalyysien laatu: vaatimukset tilaajalle ja toteuttajalle. Tutkimusraportti VTT-R-03718-07. haettu 16.2.2019 osoitteesta https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2007/Tutkimusraportti_VTT_R_03718_07.pdf

Heiskanen, R. (2016) Maanvastaisten seinien sisäpuolinen lisälämmöneristäminen. Diplomityö. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Tampereen teknillinen yliopisto.

Hometalkoot (n.d.). Sisäilman kemialliset epäpuhtaudet. Haettu 9.3.2019 osoitteesta <https://hometalkoot.fi/file/15926.pptx>

Hometalkoot (2016a). Ongelmakohtat, 1970-luvun omakotitalo. Haettu 30.3.2019 osoitteesta https://www.hometalkoot.fi/pdf/omakotitalo/1970_omakotitalo_ongelmakohtat.pdf

Hometalkoot (2016b). Ongelmakohtat, 1980-luvun omakotitalo. Haettu 30.3.2019 osoitteesta https://www.hometalkoot.fi/pdf/omakotitalo/1980_omakotitalo_ongelmakohtat.pdf

Hometalkoot (2016c). Ongelmakohtat, 1990-luvun omakotitalo. Haettu 30.3.2019 osoitteesta https://www.hometalkoot.fi/pdf/omakotitalo/1990_omakotitalo_ongelmakohtat.pdf

Hometalkoot (2016d). Rakennusosat, 1950-luvun omakotitalo. Haettu 30.3.2019 osoitteesta https://www.hometalkoot.fi/pdf/omakotitalo/1950_omakotitalo_osat.pdf

Hongisto, L. (2016). Kaksoislaattapalkiston korjausmenetelmät sisäilman laadun parantamiseksi. Opinnäytetyö. Rakennusterveysasiantuntijan koulutusohjelma. Rateko.

Ilmatieteen laitos (2013). Rakennusfysiikan ilmastolliset testivuodet nykyilmastossa. Haettu 15.8.2017 osoitteesta <http://ilmatieteenlaitos.fi/Rakennusfysiikan-testivuodet-nykyilmastossa>

Incropera, F., DeWitt, D., Bergman T. & Lavine, A. (2007) Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6th Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Jokipii, M. (2014) Betonilattioiden VOC-korjausmenetelmien vertailu. Opinnäytetyö. Rakentamisen koulutusohjelma. Hämeen ammattikorkeakoulu.

Jylhä, K. (2017). RE: Rakennusfysikaaliseen testivuoteen Jokioinen 2004 liittyen. Sähköpostiviestit tekijälle 14–22.9.2017.

Järnström, H. (2005). Muovimattopinnoitteisen lattiarakenteen VOC emissiot sisäilmaongelmatapauksissa. VTT Publications 571. Espoo.

Järnström, H. (2015). ERZ4941 rakennusterveys ja sisäympäristö. Luennot 6.2.2015, Savonia ammattikorkeakoulu.

Kivikoski, H. (1989). Talonrakennuksen routasuojausohjeet, 2. Painos, VTT geotekniikan laboratorio ja Rakentajain Kustannus Oy. Mänttä: Mäntän kirjapaino Oy.

- Knuutila, A. (2016). Erityismenettely ulkoseinän rakennusfysikaalisessa suunnittelussa. RATEKO, RTA-opinnäytteen esitys. Viitattu 16.2.2019 https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/rateko/rta-seminaarit/rta-1-seminaari/knuutila_anssi.pdf
- Knuutila, A. (2017). Riskianalyysi rakennusfysikaalisen toiminnantoiminnan varmistamisen työkaluna. Teoksessa Vinha, J. & Kivioja, H. (toim.) Rakennusfysiikka 2017, Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut, Osa 1. Tampere: Juvenes Print - Suomen Yliopistopaino Oy, 39–44.
- Kolu, P. (2013). VOC-vaurioituneiden ja mattopinnoitettujen betonilattioiden korjaushanke projektihallinnan näkökulmasta. YAMK-opinnäytetyö Teknologiaosaamisen johtamisen koulutusohjelma. Jyväskylän ammattikorkeakoulu.
- Kangas, A. (2017). VM 22/2017 Ohje riskienhallintaan, riskiarviointityökalu - käyttö- ja täyttöohje. Viitattu 16.2.2019. https://www.vah-tiohje.fi/c/document_library/get_file?uuid=40bf6302-b7b8-4afc-88ce-106c40790d88&groupId=10128
- Komulainen, J., Huttunen, J. & Sääntti, J. (2010) Haitalliset aineet rakennuksissa ja niiden hallinta. Teoksessa Rakentajain kalenteri 2011. Rakennustietosäätiö, Rakennustieto Oy & AMK RKL (toim.). Helsinki: Rakennustieto, 98–106.
- Koskela S. (2017). Öljyhiilivetyjen ja pah-yhdisteiden huomioiminen teollisuuskiinteistön käyttötarkoituksen muutoksessa. RTA-loppuseminaarin esitys. Haettu 21.12.2018 osoitteesta <https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/rateko/rta-seminaarit/rta-2/oljyhiilivetyjen-ja-pah-yhdisteiden-huomioiminen-teollisuuskiinteiston-kayttotarkoituksen-muutoksessa.pdf>
- Kuivikko, M. (2018a) Sisäilman epäpuhtaudet. Sisäilmakemia opintojakson verkkoaineisto. Metropolia ammattikorkeakoulu, Moodle. Viitattu 8.12.2018. <https://moodle.metropolia.fi/>
- Kuivikko, M. (2018b) Epäpuhtauksien kulkeutumismekanismit. Sisäilmakemia opintojakson verkkoaineisto. Metropolia ammattikorkeakoulu, Moodle. Viitattu 8.12.2018. <https://moodle.metropolia.fi/>
- Laaksonen, J. (2015). Haitta-ainepitoisten rakennusmateriaalien käsittely korjaus- ja purkutyömailla. Diplomityö. Materiaalitekniikan koulutusohjelma. Aalto-yliopisto.
- Laine K. (2014). Rakenteiden ilmatiiviyden parantaminen sisäilmakorjauksessa. Opinnäytetyö. Rakennusterveys. Itä-Suomen yliopisto.

Laukkarinen, A., Heiskanen, R. & Vinha, J. (2017). Maanvastaisten seinien lämpö- ja kosteustekninen toiminta. Teoksessa Vinha, J. & Kivioja, H. (toim.) Rakennusfysiikka 2017, Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut, Osa 1. Tampere: Juvenes Print - Suomen Yliopistopaino Oy, 71–76.

Lehtinen, T. (2003). Rakenteiden lämpö- ja kosteustekninen suunnittelu. Rakennusmestarit ja -insinöörit AMK RKL & Rakennustietosäätiö (toim.) Rakentajain kalenteri 2004. Helsinki: Rakennustieto 2003, s. 444–450.

Lehtoviita, T. & Laine, E. (2004). Rafnet-oppimateriaalin teoriaosion Osio K (Kosteus). Rafnet-ryhmä, luonnosversio 27.09.2004. Haettu 27.07.2017 osoitteesta http://www.tekniikka.oamk.fi/~kimmoi/talrakjatko/kosteus_27092004.pdf

Leivo, V. & Rantala, J. (2002a). Maanvastaisten alapohjarakenteiden kosteustekninen toimivuus. Julkaisu 120. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikka.

Leivo, V. & Rantala, J. (2002b). Maanvastaiset alapohjarakenteet - kosteustekninen mitoittaminen ja korjaaminen. Julkaisu 121. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikka.

Leivo, V. & Rantala, J. (2006a). Maanvastaisten alapohjarakenteiden lämpö ja kosteus. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

Leivo, V. & Rantala, J. (2006b). Maanvastaisten rakenteiden mikrobiologinen toimivuus. Julkaisu 139. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennetekniikan laitos.

Lindberg, R., Wahlman, J., Suonketo, J. & Paukku, E. (2002). Kosteusvirta – tutkimus. Julkaisu 119. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikka.

Maankäyttö- ja rakennuslaki 2014/41. Haettu 15.3.2019 osoitteesta <http://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132#a17.1.2014-41>

Merikallio, T., Niemi, S. & Komonen, J. (2007). Betonilattiarakenteiden kosteudenhallinta ja päällystäminen. Lahti: Betonikeskus Ry / Suomen Betonitieto Oy

Mäkitalo, M. (2012) Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Diplomityö. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Tampereen teknillinen yliopisto.

Neuvonen, P. (2006) Kerrostalot 1880–2000. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Neuvonen, P., Mäkiö, E. & Malinen, M. (2002) Kerrostalot 1880–1940. Tampere: Rakennustieto Oy.

Pekkala V. 2010. Kosteudenhallinta ja homevaurion estäminen –miten hoidetaan. Kosteudenhallinta ja RIL-ohjeet. Haettu 24.10.2016 osoitteesta http://www.ril.fi/media/files/pekkala_ril_verkko.pdf

Penttala, V. (1991). Betonitekniikan 100 ensimmäistä vuotta suomessa. Teoksessa Suomen Betoniyhdistys r.y. Betoni Suomessa 1860–1960. Jyväskylä: Gummerus kirjapaino Oy, 9–30.

Rantala, J. (2010). Maanvastaisten rakenteiden toiminta ja korjaukset sisäpuolelta. Luentoaineisto. Rakennustekniikka. Tampereen Teknillinen Yliopisto.

RIL (1989). RIL 107-1989, Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. Tampere: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

RIL (2011). RIL 250-2011, Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

RIL (2012). RIL 107-2012, Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

RIL (2014). RIL 255-1-2014, Rakennusfysiikka Osa 1: Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

RIL (2016). RIL 241-2016, Erityismenettelyn soveltaminen – rakennuksen turvallisuus, terveellisyys ja kulttuurihistorialliset arvot. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

Sirviö, S. (2007). Rakennusten haitta-aineet. Opinnäytetyö. Ympäristötekniikan koulutusohjelma. Lahden ammattikorkeakoulu.

Siikanen, U. (2011). Rakennusten lämpö- ja kosteusfysikaalisia näkökohtia. Teoksessa Rakentajan kalenteri 2012. Rakennustietosäätiö, Rakennustieto Oy & AMK RKL (toim.). Helsinki: Rakennustieto, 73–88.

Siikanen, U. (2014). Rakennusfysiikka, perusteet ja sovelluksia. Tampere: Rakennustieto Oy.

Sitowise (2019). Sitowise yleisesitys. Sitowise, yrityksen intranet. Viitattu 19.1.2019. <https://sitowise.sharepoint.com/>

Säteri, J. (2018). Muovipäällysteisten betonilattioiden sisäilmaongelmat. Sisäilmakemia opintojakson verkkoaineisto. Metropolia ammattikorkeakoulu, Moodle. Viitattu 8.12.2018. <https://moodle.metropolia.fi/>

- Tampereen yliopisto (2019a). Suomalainen homemalli. Viitattu 04.03.2019. <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/suomalainen-ho-memalli/>
- Tampereen yliopisto (2019b). Kosteusanalysointimenetelmä. Viitattu 04.03.2019. <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/kosteusanalysointi-menetelma/>
- Tompuri, V., Mölsä, S. (2016). Tiivistyskorjausten epäonnistumisista on otettu opiksi Vantaalla. Rakennuslehti. Julkaistu 5.2.2016. Viitattu 24.1.2017. <http://www.rakennuslehti.fi/2016/02/tiivistyskorjausten-epaonnistumisista-otettua-opiksi-vantaalla/>
- Työterveyslaitos (2016). PAH-yhdisteiden tavoitetasoperustelumuu-
stio. Haettu 6.1.2019 osoitteesta <https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2016/12/pah-yhdisteet-tavoitetaso.pdf>
- Työterveyslaitos (2018a). Bentseeni. Kansainväliset kemikaalikortit. Haettu 6.1.2019 osoitteesta https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=fi&p_card_id=0015&p_version=2
- Työterveyslaitos (2018b). Naftaleeni. Kansainväliset kemikaalikortit. Haettu 6.1.2019 osoitteesta https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=fi&p_card_id=0667&p_version=2
- Vinha, J. (2007). Rakennusfysiikan perussäännöt suunnittelussa ja rakentamisessa. Rakennusmestarit ja -insinöörit AMK RKL & Rakennustietosäätiö (toim.) Rakentajain kalenteri 2008. Helsinki: Rakennustieto 2007, s.394-409.
- Vinha, J. (2010). RIL 255-2010, luku 4 Lämpö ja lämmön siirtyminen (luonnos 13.10.2010). Haettu 27.07.2017 osoitteesta <http://docplayer.fi/3499888-4-lampo-ja-lammon-siirtyminen.html>
- Vinha, J. (2011a). RTEK-3511 Rakennusfysiikka Luentomoniste 2011, Osa 1 Rakennustekniikka. Tampereen teknillinen yliopisto.
- Vinha, J. (2011b). RTEK-3511 Rakennusfysiikka Luentomoniste 2011, Osa 2 Rakennustekniikka. Tampereen teknillinen yliopisto.
- Vinha, J., Laukkanen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A., Suonketo, J., Jokisalo, J., Teriö, O., Koskenvesa, A. & Palolahti, T. (2013). Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteustekniik-
sessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos, Tutkimusraportti 159.

Ylihärsilä, H. (2004). Rafnet-oppimateriaalin teoriaosion Osio L (Lämpö). Rafnet-ryhmä, luonnosversio 27.09.2004. Haettu 27.07.2017 osoitteesta <http://www.tekniikka.oamk.fi/~kimmoi/talrakjatko/lampoo-sio27092004.pdf>

Ympäristöministeriö (2002). C4 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Lämmöneristys Ohjeet 2003. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. Helsinki.

Ympäristöministeriö (2016). Ympäristöopas 2016. Pitkäranta, M. (toim.) Ympäristöministeriö ISBN 978-952-11-4625-1. Helsinki.

Wikipedia (2018a). Aromaattinen yhdiste. Haettu 6.1.2019 osoitteesta https://fi.wikipedia.org/wiki/Aromaattinen_yhdiste

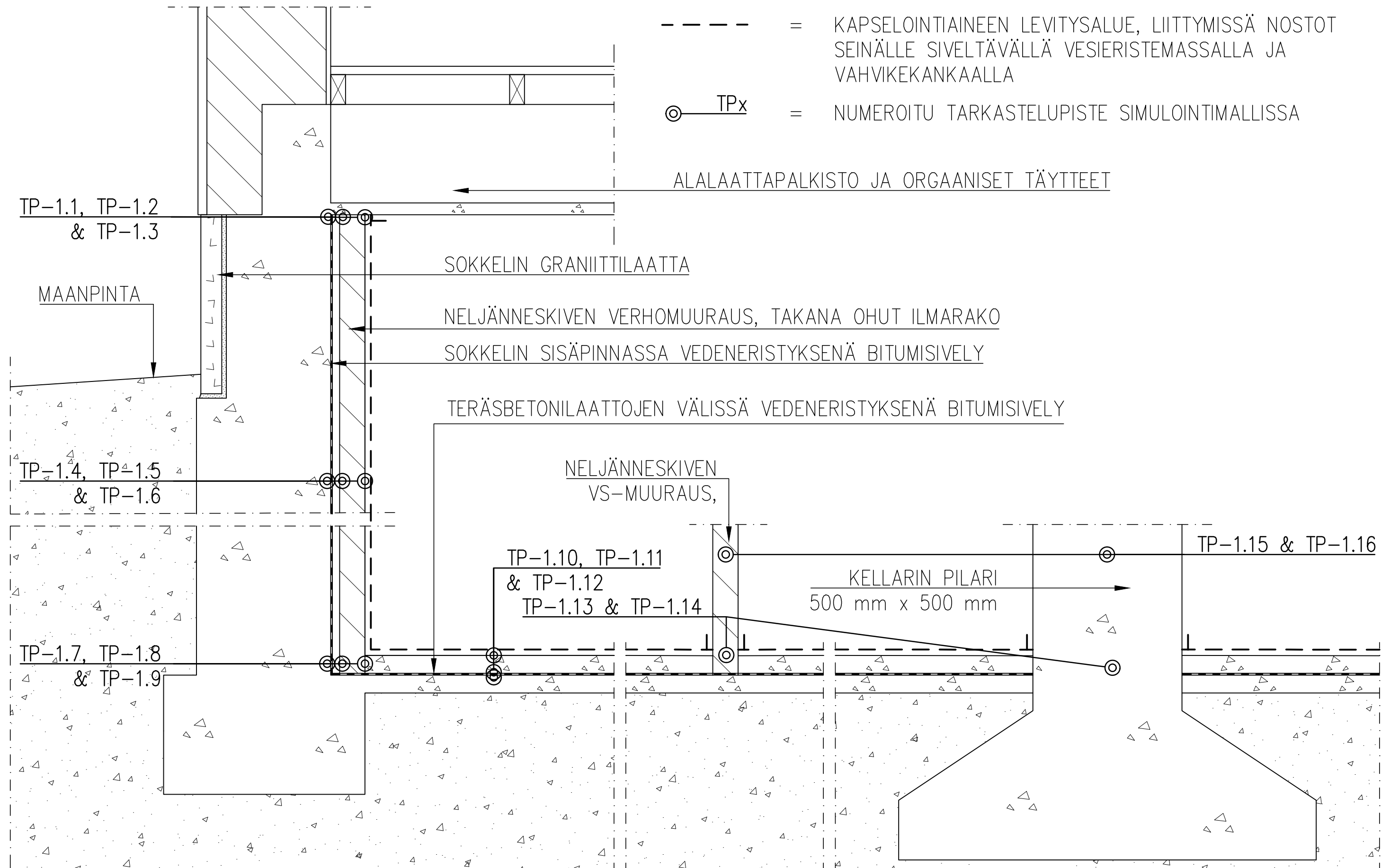
Wikipedia (2018b). Bentseeni. Haettu 6.1.2019 osoitteesta <https://fi.wikipedia.org/wiki/Bentseeni>

WUFI (2009). Moisture Transport in Building Materials. Haettu 28.11.2017 osoitteesta <https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:Physics>

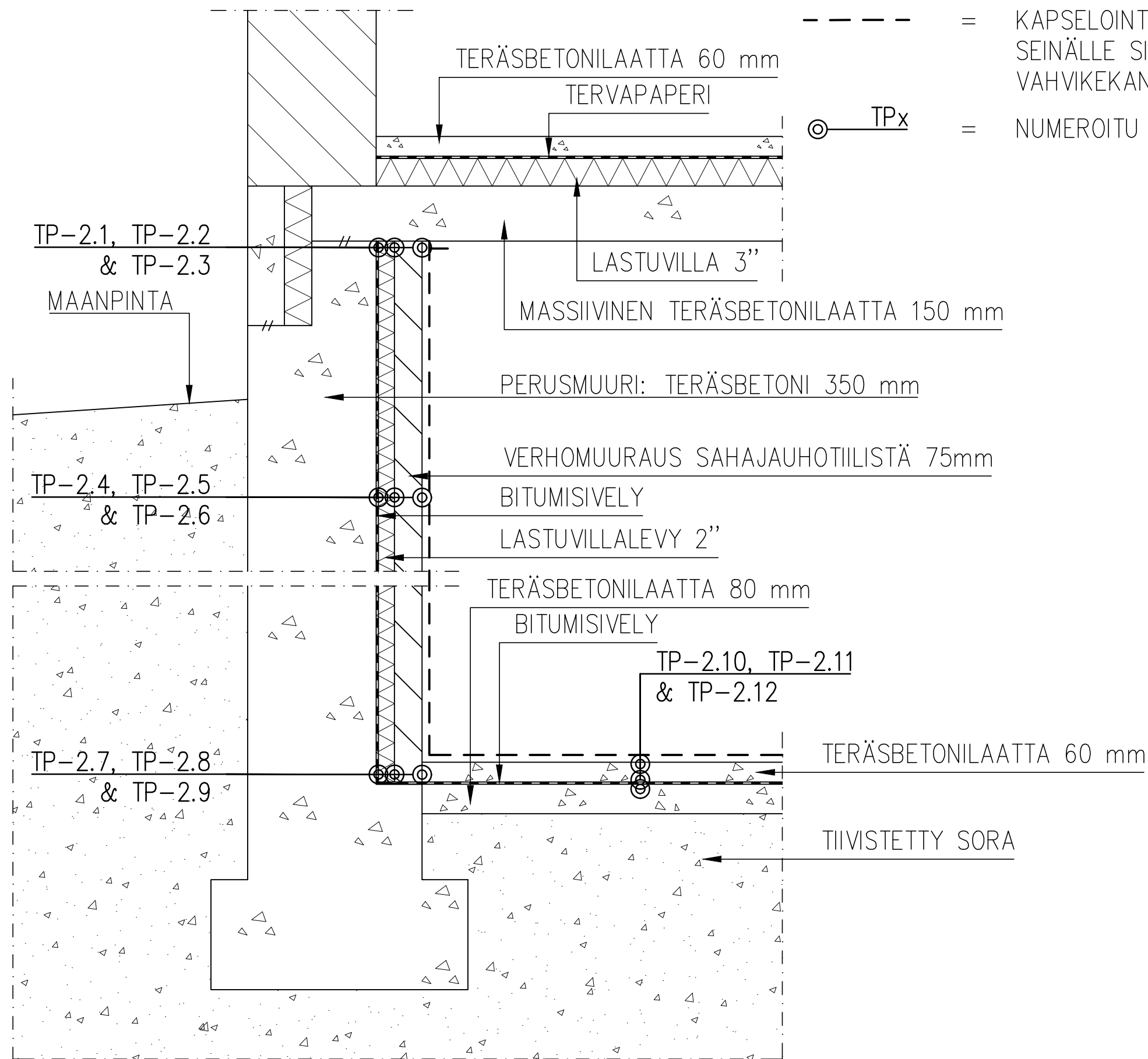
WUFI (2013). FAQ, general, water content of an air layer. Haettu 29.04.2019 osoitteesta <https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/FAQ:General:WaterContentofanAirLayer>

WUFI (2017). What is WUFI®? Haettu 28.11.2017 osoitteesta <https://wufi.de/en/software/what-is-wufi/>

TAPAUK A:
MK 1:12



TAPAUK B:
MK 1:12



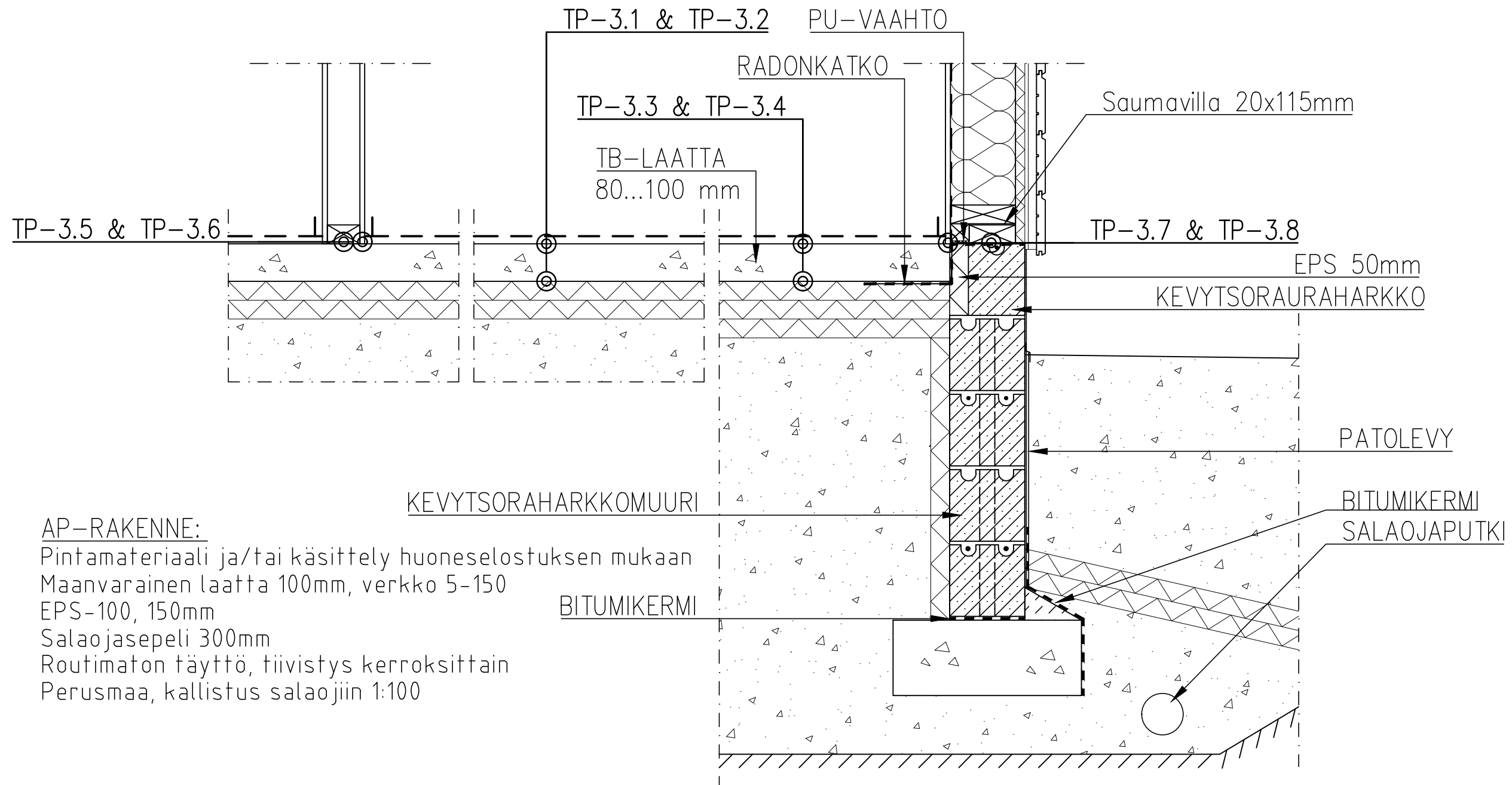
= KAPSELOINTIINEEN LEVITYSALUE, LIITTYMISSÄ NOSTOT SEINÄLLE SIVELTÄVÄLLÄ VESIERISTEMASSALLA JA VAHVIKEKANKAALLA

⊗ TPx

= NUMEROITU TARKASTELUPISTE SIMULOINTIMALLISSA

TAPAUK C:
MK 1:12

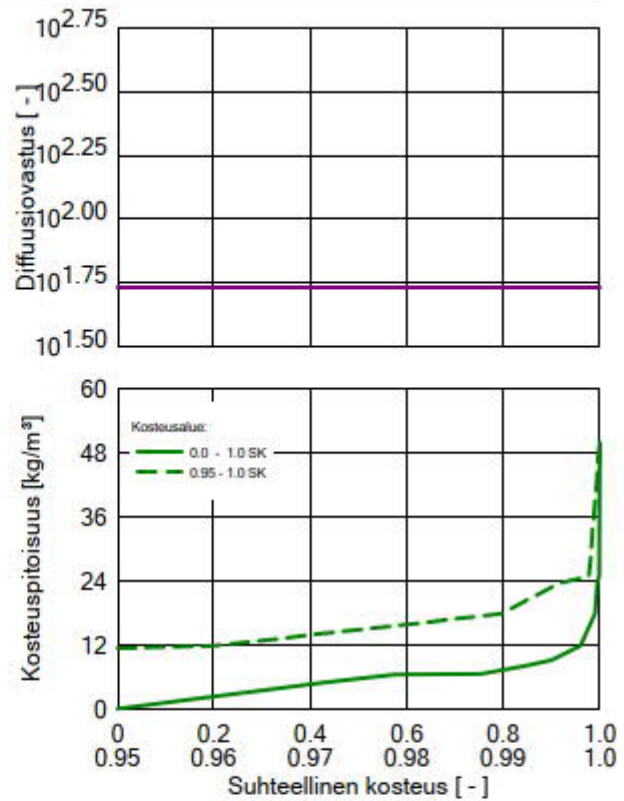
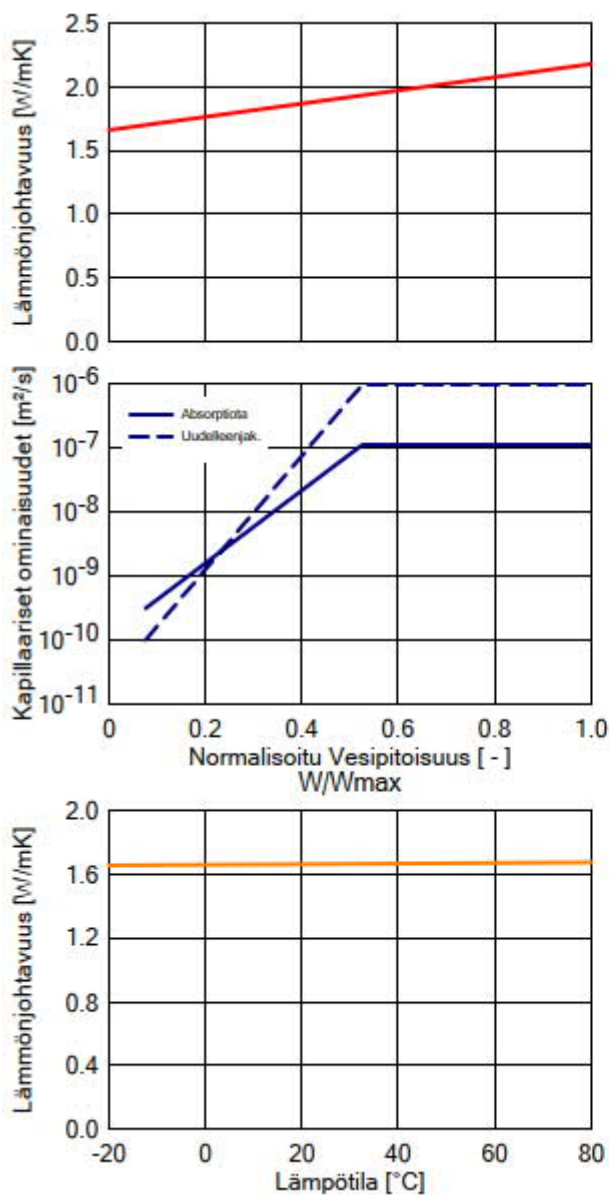
- = KAPSELOINTIAINEEN LEVITYSALUE, LIITTYMISSÄ NOSTOT SEINÄLLE SIVELTÄVÄLLÄ VESIERISTEMASSALLA JA VAHVIKEKANKAALLA
- ⊙ TPx = NUMEROITU TARKASTELUPISTE SIMULOINTIMALLISSA



Materiaali: Graniitti

Laskentaparametrien yhteenveto

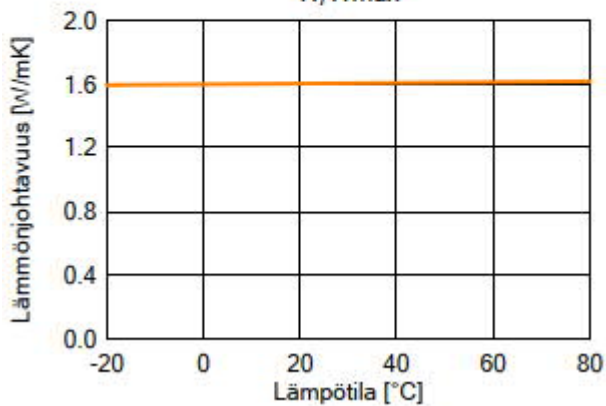
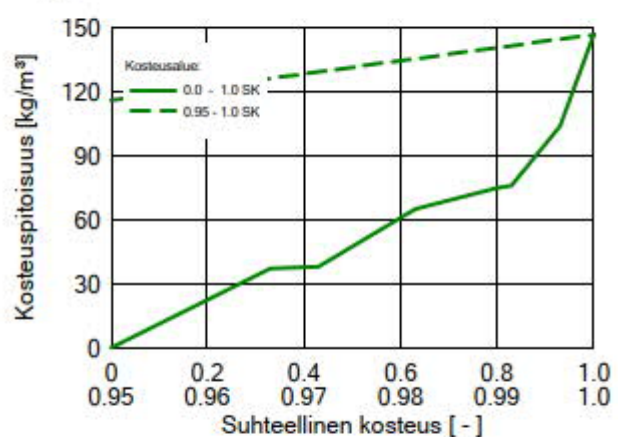
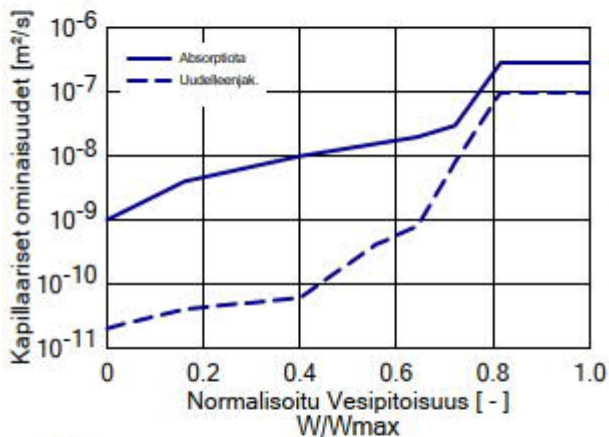
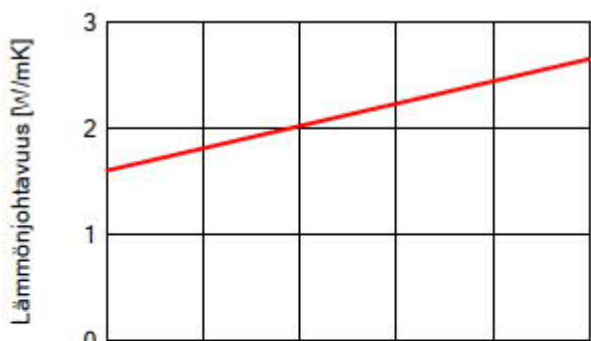
Ominaisuus	Yksikkö	Arvo
Raakatiheys	[kg/m ³]	2453,0
Huokoisuus	[m ³ /m ³]	0,095
Ominaislämpökapaiteetti, Kuiva	[J/kgK]	702,0
Lämmönjohtavuus, Kuiva ,10°C	[W/mK]	1,66
Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin	[-]	54,0
Kosteuspitoisuus, 80%-rh	[kg/m ³]	7,3
Vapaa vesikyllästys	[kg/m ³]	50,0
Veden absorptiokerroin	[kg/m ² s ^{0.5}]	0,0086
Lämmönjohtavuuden kosteusriippuvuus	[%/M.-%]	8,0
Lämmönjohtavuuslisä, f(T)	[W/mK ²]	0,0002



Materiaali: Betoni, VSS=0,6

Laskentaparametrien yhteenveto

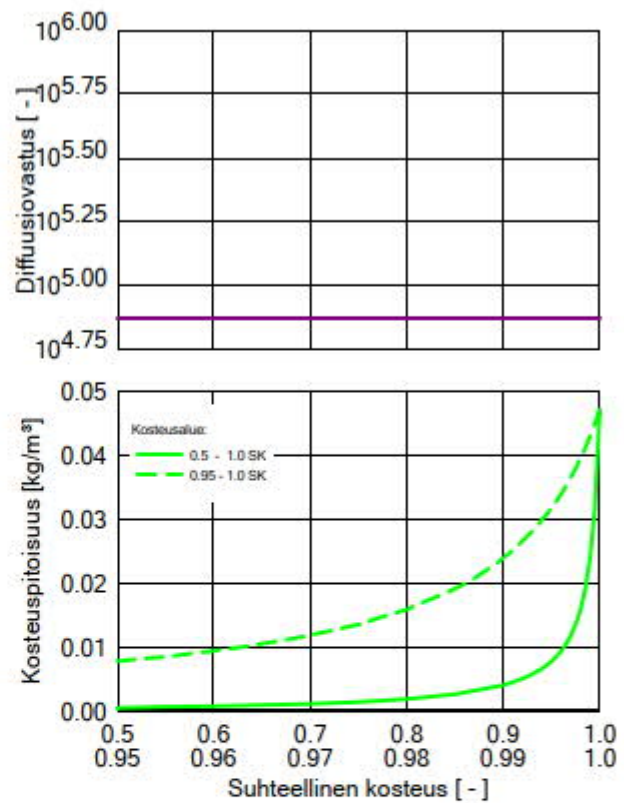
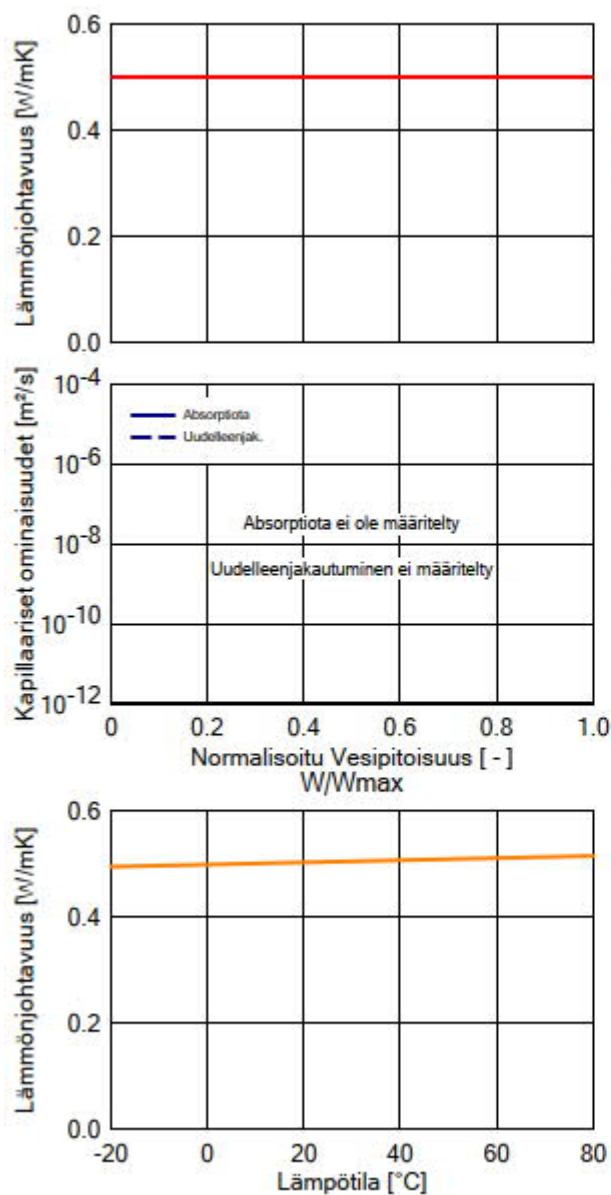
Ominaisuus	Yksikkö	Arvo
Raakatiheys	[kg/m ³]	2220,0
Huokoisuus	[m ³ /m ³]	0,18
Ominaislämpökapaiteetti, Kuiva	[J/kgK]	850,0
Lämmönjohtavuus, Kuiva, 10°C	[W/mK]	1,6
Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin	[-]	248,0
Lämmönjohtavuuden kosteusrippuvuus	[%/M.-%]	8,0
Lämmönjohtavuuslisä, f(T)	[W/mK ²]	0,0002



Materiaali: Bitumisively

Laskentaparametrien yhteenveto

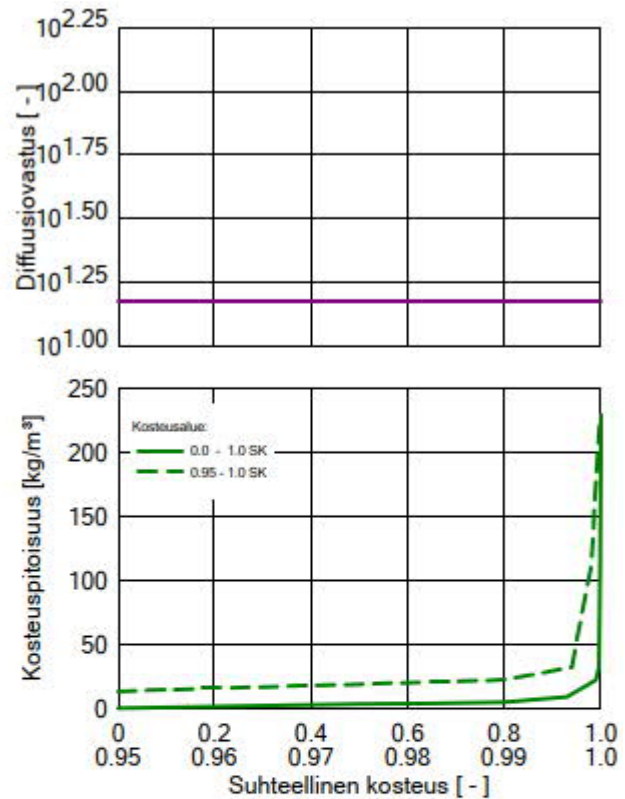
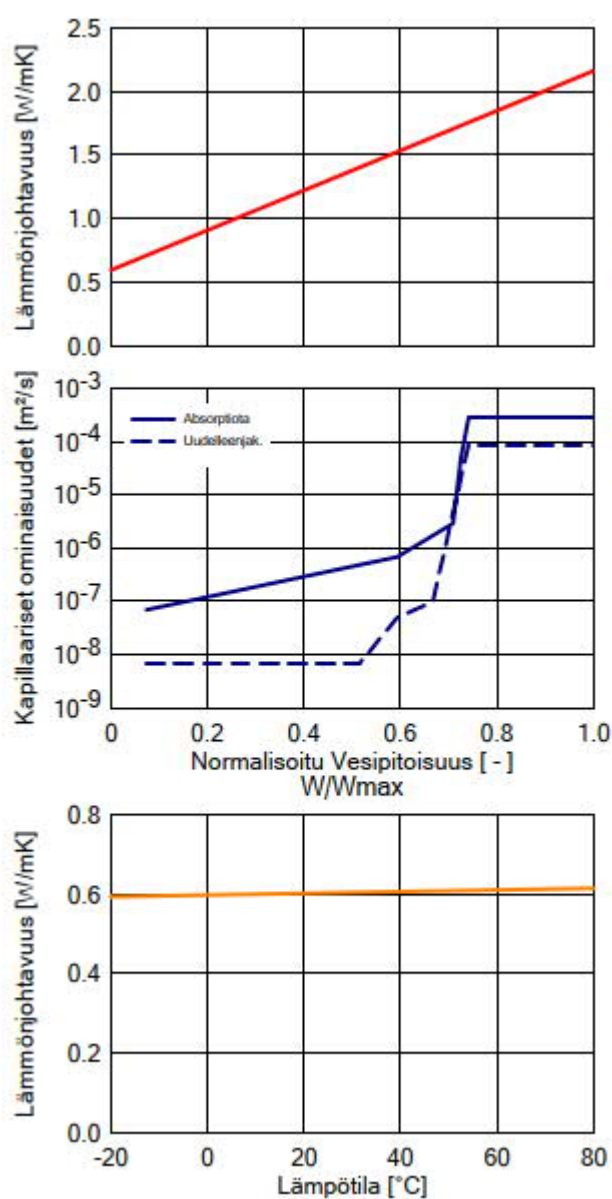
Ominaisuus	Yksikkö	Arvo
Raakatiheys	[kg/m ³]	1000,0
Huokoisuus	[m ³ /m ³]	0,001
Ominaislämpökapaiteetti, Kuiva	[J/kgK]	1700,0
Lämmönjohtavuus, Kuiva, 10°C	[W/mK]	0,5
Vesihöyryn diffuusiiovastuskerroin	[-]	75000,0
Lämmönjohtavuuslisä, f(T)	[W/mK ²]	0,0002



Materiaali: Umpitiili, historiallinen

Laskentaparametrien yhteenveto

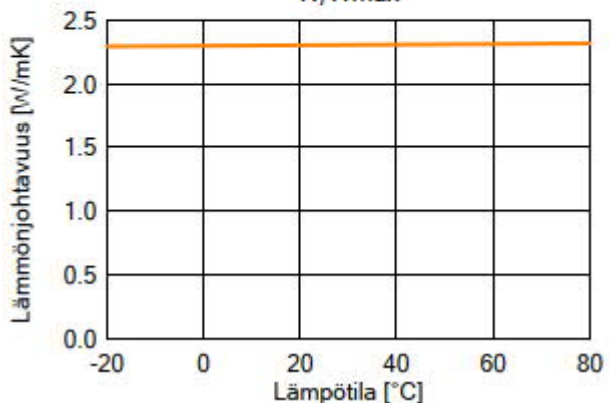
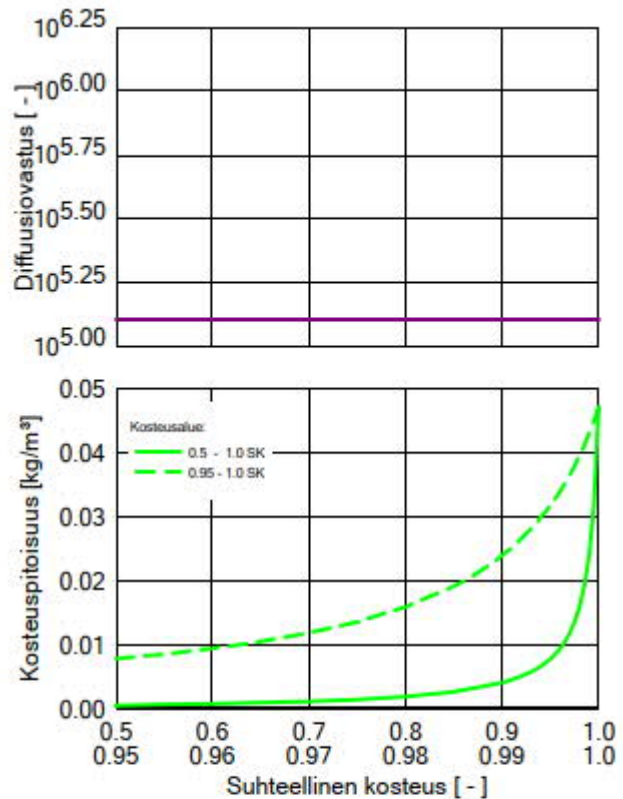
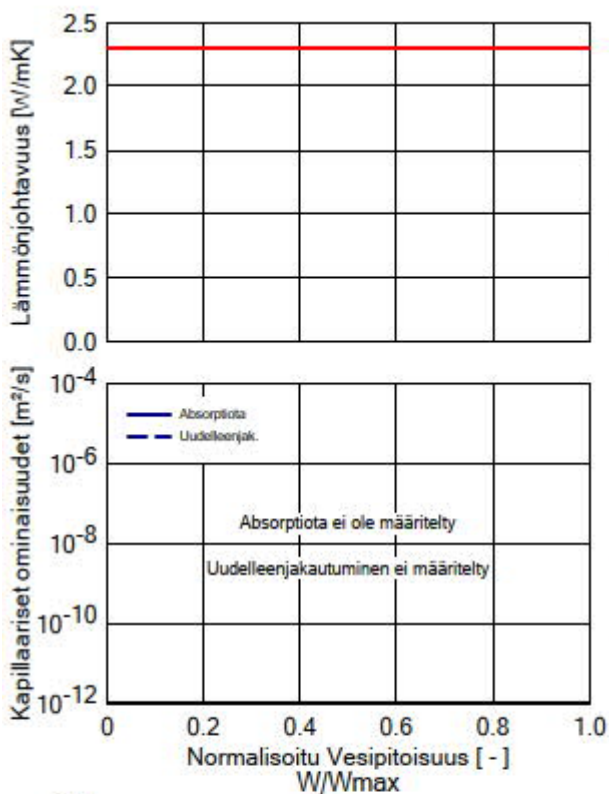
Ominaisuus	Yksikkö	Arvo
Raakatiheys	[kg/m ³]	1800,0
Huokoisuus	[m ³ /m ³]	0,31
Ominaislämpökapaiteetti, Kuiva	[J/kgK]	850,0
Lämmönjohtavuus, Kuiva, 10°C	[W/mK]	0,6
Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin	[-]	15,0
Lämmönjohtavuuden kosteusriippuvuus	[%/M.-%]	15,0
Lämmönjohtavuuslisä, f(T)	[W/mK ²]	0,0002



Materiaali: Kapselointiaine, tiivis

Laskentaparametrien yhteenveto

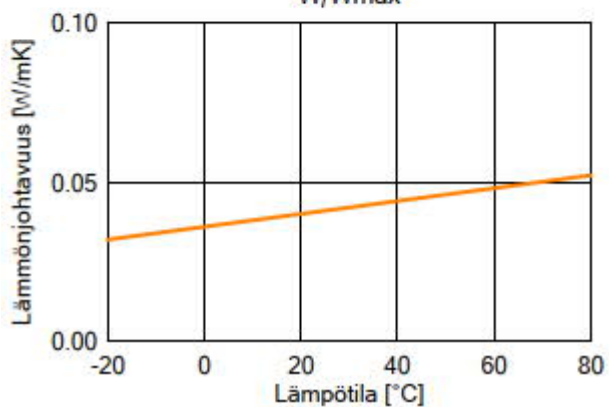
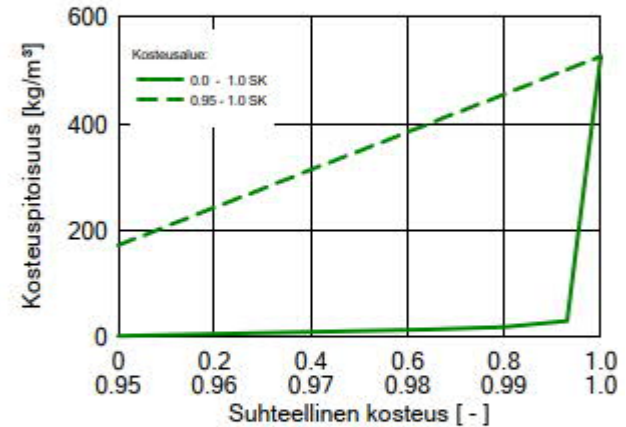
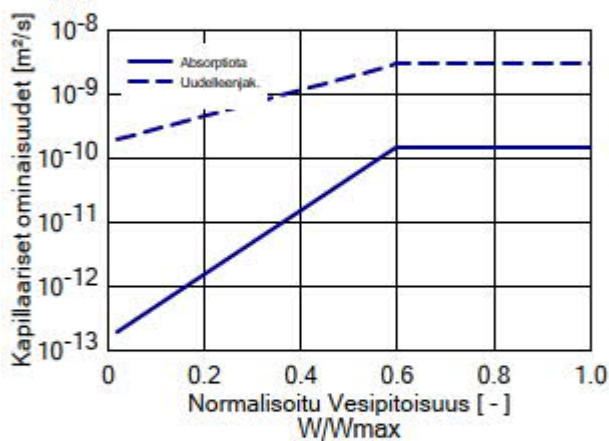
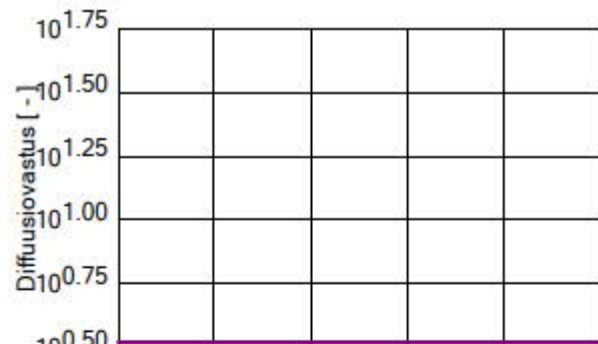
Ominaisuus	Yksikkö	Arvo
Raakatiheys	[kg/m ³]	130,0
Huokoisuus	[m ³ /m ³]	0,001
Ominaislämpökapaiteetti, Kuiva	[J/kgK]	2300,0
Lämmönjohtavuus, Kuiva, 10°C	[W/mK]	2,3
Vesihöyryn diffuusiiovastuskerroin	[-]	128800,0
Lämmönjohtavuuslisä, f(T)	[W/mK ²]	0,0002



Materiaali: Lastuvillalevy

Laskentaparametrien yhteenveto

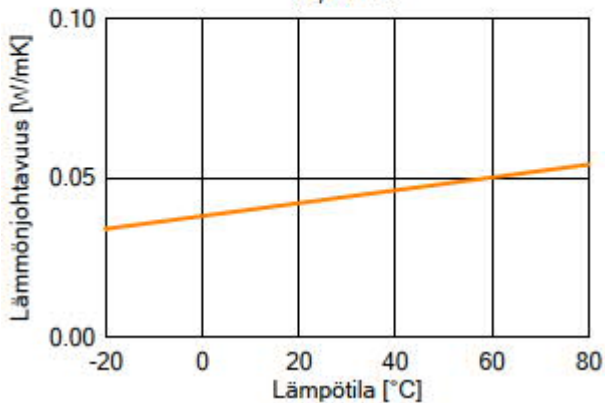
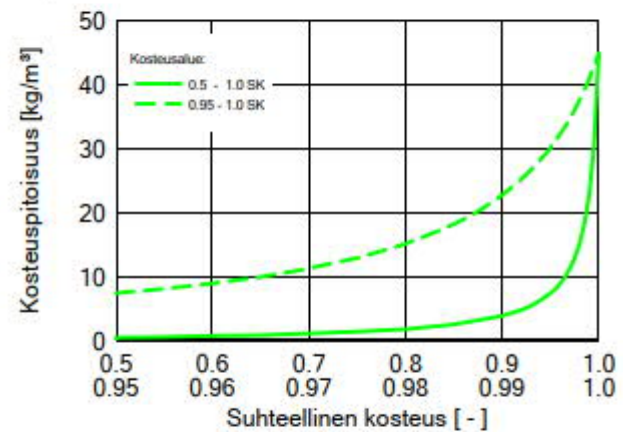
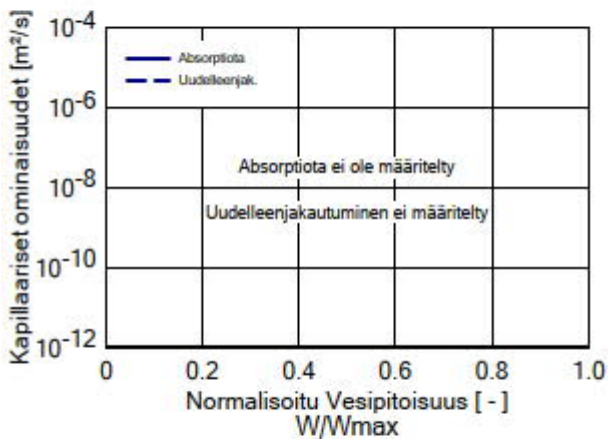
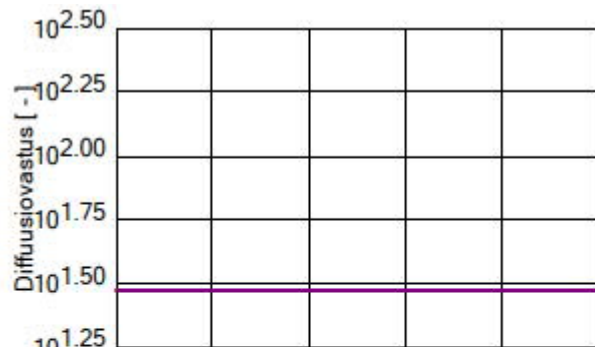
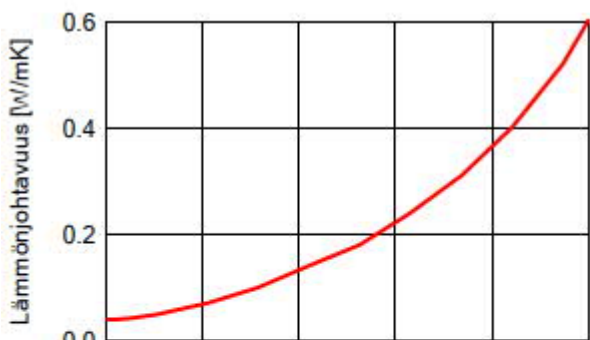
Ominaisuus	Yksikkö	Arvo
Raakatiheys	[kg/m ³]	168,0
Huokoisuus	[m ³ /m ³]	0,88
Ominaislämpökapaiteetti, Kuiva	[J/kgK]	1700,0
Lämmönjohtavuus, Kuiva, 10°C	[W/mK]	0,038
Vesihöyryn diffuusiokerroin	[-]	3,3
Kosteuspitoisuus, 80%-rh	[kg/m ³]	17,0
Vapaa vesikyllästys	[kg/m ³]	526,0
Veden absorptiokerroin	[kg/m ² s ^{0.5}]	0,0033
Lämmönjohtavuuslisä, f(T)	[W/mK ²]	0,0002



Materiaali: EPS

Laskentaparametrien yhteenveto

Ominaisuus	Yksikkö	Arvo
Raakatiheys	[kg/m ³]	15,0
Huokoisuus	[m ³ /m ³]	0,95
Ominaislämpökapaiteetti, Kuiva	[J/kgK]	1500,0
Lämmönjohtavuus, Kuiva, 10°C	[W/mK]	0,04
Vesihöyryn diffuusiokerroin	[-]	30,0
Lämmönjohtavuuslisä, f(T)	[W/mK ²]	0,0002



TAPAUS A, lämpötila-alueiden vertailu: maanvastainen seinä

Maan lämpötila, T_u [°C]		Koko rakenteen pintalämpötila, T [°C]					sisälämpötila, T_s [°C]	
Kellarin seinä, reuna-alue: 0,5 m syvyydeltä mitattujen arvojen matalin maan lämpötila (Jokioinen 2004)								
	Yksiköt	maa	betoni	bitumi	ilmarako	tiili	sisäpinta	
paksuus, d	[m]	-	0,45	0,001	0,02	0,085	-	
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	2,3	1,2	0,13	-	0,65	-	
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b	R_3	R_2	R_g	R_1	R_{si}	ΣR
		0,25	0,375	0,007692	0,15	0,130769	0,13	1,043462
lämmönvastuksien %-osuudet		24,0 %	35,9 %	0,7 %	14,4 %	12,5 %	12,5 %	100,0 %
pintalämpötila, T [°C]	0,2	5,2	10,9	10,9	12,4	13,5	14,4	21

Kellarin seinä, reuna-alue: 0,5 m syvyydeltä mitattujen arvojen korkein maan lämpötila (Jokioinen 2004)								
	Yksiköt	maa	betoni	bitumi	ilmarako	tiili	sisäpinta	
paksuus, d	[m]	-	0,45	0,001	0,02	0,085	-	
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	2,3	1,2	0,13	-	0,65	-	
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b	R_3	R_2	R_g	R_1	R_{si}	ΣR
		0,25	0,375	0,007692	0,15	0,130769	0,13	1,043462
lämmönvastuksien %-osuudet		24,0 %	35,9 %	0,7 %	14,4 %	12,5 %	12,5 %	100,0 %
pintalämpötila, T [°C]	16,3	17,4	18,7	18,7	19,1	19,3	19,5	21

Maan lämpötila, T_u [°C]		Koko rakenteen pintalämpötila, T [°C]					sisälämpötila, T_s [°C]	
Kellarin seinä, sisäalue: 1 m ja 3 m syvyydeltä mitattujen arvojen keskiarvo, matalin maan lämpötila (Jokioinen 2004)								
	Yksiköt	maa	betoni	bitumi	ilmarako	tiili	sisäpinta	
paksuus, d	[m]	-	0,45	0,001	0,02	0,085	-	
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	2,3	1,2	0,13	-	0,65	-	
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b	R_3	R_2	R_g	R_1	R_{si}	ΣR
		1	0,375	0,007692	0,15	0,130769	0,13	1,793462
lämmönvastuksien %-osuudet		55,8 %	20,9 %	0,4 %	8,4 %	7,3 %	7,2 %	100,0 %
pintalämpötila, T [°C]	3,25	13,1	14,8	14,8	15,3	15,7	16,1	21

Kellarin seinä, sisäalue: 1 m ja 3 m syvyydeltä mitattujen arvojen keskiarvo, korkein maan lämpötila (Jokioinen 2004)								
	Yksiköt	maa	betoni	bitumi	ilmarako	tiili	sisäpinta	
paksuus, d	[m]	-	0,45	0,001	0,02	0,085	-	
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	2,3	1,2	0,13	-	0,65	-	
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b	R_3	R_2	R_g	R_1	R_{si}	ΣR
		1	0,375	0,007692	0,15	0,130769	0,13	1,793462
lämmönvastuksien %-osuudet		55,8 %	20,9 %	0,4 %	8,4 %	7,3 %	7,2 %	100,0 %
pintalämpötila, T [°C]	9,95	16,1	17,1	17,2	17,5	17,7	18,0	21

Sisäpinnan pintavastuksen käänteisluku
7,69

TAPAUS A, lämpötila-alueiden vertailu: maanvastainen lattia

Maan lämpötila, T_u [°C]Koko rakenteen pintalämpötila, T [°C]sisälämpötila, T_s [°C]

Kellarin lattia, sisäalue: 3 m syvyydeltä mitattujen arvojen matalin maan lämpötila (Jokioinen 2004)								
	Yksiköt	maa	betoni	bitumi	betoni		sisäpinta	
paksuus, d	[m]	-	0,08	0,001	0,08		-	
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	2,3	1,2	0,13	1,2		-	
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b	R_4	R_3	R_2	R_1	R_{si}	ΣR
		2	0,066667	0,007692	0,066667		0,17	2,311026
lämmönvastuksien %-osuudet		86,5 %	2,9 %	0,3 %	2,9 %	0,0 %	7,4 %	100,0 %
pintalämpötila, T [°C]	4,8	18,8	18,9	18,9	19,0	19,0	19,1	21

Kellarin lattia, sisäalue: 3 m syvyydeltä mitattujen arvojen korkein maan lämpötila (Jokioinen 2004)								
	Yksiköt	maa	betoni	bitumi	betoni		sisäpinta	
paksuus, d	[m]	-	0,08	0,001	0,08		-	
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	2,3	1,2	0,13	1,2		-	
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b	R_4	R_3	R_2	R_1	R_{si}	ΣR
		2	0,066667	0,007692	0,066667		0,17	2,311026
lämmönvastuksien %-osuudet		86,5 %	2,9 %	0,3 %	2,9 %	0,0 %	7,4 %	100,0 %
pintalämpötila, T [°C]	8	19,3	19,3	19,3	19,4	19,4	19,5	21

Maan lämpötila, T_u [°C]Koko rakenteen pintalämpötila, T [°C]sisälämpötila, T_s [°C]

Kellarin lattia, sisäalue: 4 m syvyydeltä mitattujen arvojen matalin maan lämpötila (Jokioinen 2004)								
	Yksiköt	maa	betoni	bitumi	betoni		sisäpinta	
paksuus, d	[m]	-	0,08	0,001	0,08		-	
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	2,3	1,2	0,13	1,2		-	
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b	R_3	R_2	R_1		R_{si}	ΣR
		2	0,066667	0,007692	0,066667		0,17	2,311026
lämmönvastuksien %-osuudet		86,5 %	2,9 %	0,3 %	2,9 %	0,0 %	7,4 %	100,0 %
pintalämpötila, T [°C]	5,4	18,9	19,0	19,0	19,0	19,0	19,2	21

Kellarin lattia, sisäalue: 4 m syvyydeltä mitattujen arvojen korkein maan lämpötila (Jokioinen 2004)								
	Yksiköt	maa	betoni	bitumi	betoni		sisäpinta	
paksuus, d	[m]	-	0,08	0,001	0,08		-	
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	2,3	1,2	0,13	1,2		-	
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b	R_3	R_2	R_1		R_{si}	ΣR
		2	0,066667	0,007692	0,066667		0,17	2,311026
lämmönvastuksien %-osuudet		86,5 %	2,9 %	0,3 %	2,9 %	0,0 %	7,4 %	100,0 %
pintalämpötila, T [°C]	6,9	19,1	19,2	19,2	19,2	19,2	19,3	21

Maakerroksen paksuus vrt. lämmönvastus		
	Yksiköt	maa
paksuus, d	[m]	4,6
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	2,3
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b
		2

Sisäpinnan pintavastuksen käänneisluku
5,88

Tapaus B (vrt. MS 1959), lämpötila-alueiden vertailu: maanvastainen seinä

Maan lämpötila, T_u [°C]		Koko rakenteen pintalämpötila, T [°C]					sisälämpötila, T_s [°C]	
Kellarin seinä, reuna-alue: 0,5 m syvyydeltä mitattujen arvojen matalin maan lämpötila (Jokioinen 2004)								
	Yksiköt	maa	betoni	bitumi	lastuvillal.	tiili	sisäpinta	
paksuus, d	[m]	-	0,35	0,001	0,05	0,075	-	
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	2,3	1,2	0,13	0,08	0,65	-	
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b	R_4	R_3	R_2	R_1	R_{si}	ΣR
		0,25	0,291667	0,007692	0,625	0,115385	0,13	1,419744
lämmönvastuksien %-osuudet		17,6 %	20,5 %	0,5 %	44,0 %	8,1 %	9,2 %	100,0 %
pintalämpötila, T [°C]	0,2	3,9	7,4	7,5	13,4	14,0	14,7	21

Kellarin seinä, reuna-alue: 0,5 m syvyydeltä mitattujen arvojen korkein maan lämpötila (Jokioinen 2004)								
	Yksiköt	maa	betoni	bitumi	lastuvillal.	tiili	sisäpinta	
paksuus, d	[m]	-	0,35	0,001	0,05	0,075	-	
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	2,3	1,2	0,13	0,08	0,65	-	
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b	R_4	R_3	R_2	R_1	R_{si}	ΣR
		0,25	0,291667	0,007692	0,625	0,115385	0,13	1,419744
lämmönvastuksien %-osuudet		17,6 %	20,5 %	0,5 %	44,0 %	8,1 %	9,2 %	100,0 %
pintalämpötila, T [°C]	16,3	17,1	17,9	17,9	19,3	19,4	19,6	21

Maan lämpötila, T_u [°C]		Koko rakenteen pintalämpötila, T [°C]					sisälämpötila, T_s [°C]	
Kellarin seinä, sisäalue: 1 m ja 3 m syvyydeltä mitattujen arvojen keskiarvo, matalin maan lämpötila (Jokioinen 2004)								
	Yksiköt	maa	betoni	bitumi	lastuvillal.	tiili	sisäpinta	
paksuus, d	[m]	-	0,35	0,001	0,05	0,075	-	
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	2,3	1,2	0,13	0,08	0,65	-	
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b	R_4	R_3	R_2	R_1	R_{si}	ΣR
		1	0,291667	0,007692	0,625	0,115385	0,13	2,169744
lämmönvastuksien %-osuudet		46,1 %	13,4 %	0,4 %	28,8 %	5,3 %	6,0 %	100,0 %
pintalämpötila, T [°C]	3,25	11,4	12,7	12,7	15,1	15,4	15,8	21

Kellarin seinä, sisäalue: 1 m ja 3 m syvyydeltä mitattujen arvojen keskiarvo, korkein maan lämpötila (Jokioinen 2004)								
	Yksiköt	maa	betoni	bitumi	lastuvillal.	tiili	sisäpinta	
paksuus, d	[m]	-	0,35	0,001	0,05	0,075	-	
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	2,3	1,2	0,13	0,08	0,65	-	
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b	R_4	R_3	R_2	R_1	R_{si}	ΣR
		1	0,291667	0,007692	0,625	0,115385	0,13	2,169744
lämmönvastuksien %-osuudet		46,1 %	13,4 %	0,4 %	28,8 %	5,3 %	6,0 %	100,0 %
pintalämpötila, T [°C]	9,95	15,0	15,8	15,9	17,3	17,5	17,7	21

Sisäpinnan pintavastuksen käänteisluku
7,69Ulkopinnan pintavastuksen käänteisluku
(Ei huomioida maanvastaisissa rakenteissa)0,04 m² · K/W -> 25 W/m² · K

Tapaus B (vrt. MS 1959), lämpötila-alueiden vertailu: maanvastainen lattia

Maan lämpötila, T_u [°C]Koko rakenteen pintalämpötila, T [°C]sisälämpötila, T_s [°C]

Kellarin lattia, sisäalue: 3 m syvyydeltä mitattujen arvojen matalin maan lämpötila (Jokioinen 2004)								
	Yksiköt	maa	betoni	bitumi	betoni		sisäpinta	
paksuus, d	[m]	-	0,08	0,001	0,08		-	
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	2,3	1,2	0,13	1,2		-	
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b	R_4	R_3	R_2	R_1	R_{si}	ΣR
		2	0,066667	0,007692	0,066667		0,17	2,311026
lämmönvastuksien %-osuudet		86,5 %	2,9 %	0,3 %	2,9 %	0,0 %	7,4 %	100,0 %
pintalämpötila, T [°C]	4,8	18,8	18,9	18,9	19,0	19,0	19,1	21

Kellarin lattia, sisäalue: 3 m syvyydeltä mitattujen arvojen korkein maan lämpötila (Jokioinen 2004)								
	Yksiköt	maa	betoni	bitumi	betoni		sisäpinta	
paksuus, d	[m]	-	0,08	0,001	0,08		-	
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	2,3	1,2	0,13	1,2		-	
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b	R_4	R_3	R_2	R_1	R_{si}	ΣR
		2	0,066667	0,007692	0,066667		0,17	2,311026
lämmönvastuksien %-osuudet		86,5 %	2,9 %	0,3 %	2,9 %	0,0 %	7,4 %	100,0 %
pintalämpötila, T [°C]	8	19,3	19,3	19,3	19,4	19,4	19,5	21

Maan lämpötila, T_u [°C]Koko rakenteen pintalämpötila, T [°C]sisälämpötila, T_s [°C]

Kellarin lattia, sisäalue: 4 m syvyydeltä mitattujen arvojen matalin maan lämpötila (Jokioinen 2004)								
	Yksiköt	maa	betoni	bitumi	betoni		sisäpinta	
paksuus, d	[m]	-	0,08	0,001	0,08		-	
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	2,3	1,2	0,13	1,2		-	
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b	R_3	R_2	R_1		R_{si}	ΣR
		2	0,066667	0,007692	0,066667		0,17	2,311026
lämmönvastuksien %-osuudet		86,5 %	2,9 %	0,3 %	2,9 %	0,0 %	7,4 %	100,0 %
pintalämpötila, T [°C]	5,4	18,9	19,0	19,0	19,0	19,0	19,2	21

Kellarin lattia, sisäalue: 4 m syvyydeltä mitattujen arvojen korkein maan lämpötila (Jokioinen 2004)								
	Yksiköt	maa	betoni	bitumi	betoni		sisäpinta	
paksuus, d	[m]	-	0,08	0,001	0,08		-	
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	2,3	1,2	0,13	1,2		-	
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b	R_3	R_2	R_1		R_{si}	ΣR
		2	0,066667	0,007692	0,066667		0,17	2,311026
lämmönvastuksien %-osuudet		86,5 %	2,9 %	0,3 %	2,9 %	0,0 %	7,4 %	100,0 %
pintalämpötila, T [°C]	6,9	19,1	19,2	19,2	19,2	19,2	19,3	21

Maakerroksen paksuus vrt. lämmönvastus		
	Yksiköt	maa
paksuus, d	[m]	4,6
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	2,3
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b
		2

Sisäpinnan pintavastuksen käänteisluku

5,88 W/m² · K

TAPAUS C, lämpötila-alueiden vertailu: maanvastainen lattia

Maan lämpötila, T_u [°C]	Koko rakenteen pintalämpötila, T [°C]	sisälämpötila, T_s [°C]
----------------------------	---------------------------------------	---------------------------

Maanvarainen lattia, reuna-alue: 1 m syvyydeltä mitattujen arvojen matalin maan lämpötila (Jokioinen 2004)								
	Yksiköt	maa	EPS	betoni			sisäpinta	
paksuus, d	[m]	-	0,15	0,08			-	
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	1,4	0,041	1,2			-	
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b	R_2	R_1			R_{si}	ΣR
		0,8	3,658537	0,066667			0,17	4,695203
lämmönvastuksien %-osuudet		17,0 %	77,9 %	1,4 %	0,0 %	0,0 %	3,6 %	100,0 %
pintalämpötila, T [°C]	1,5	4,8	17,4	17,5	17,5	17,5	17,6	21

Maanvarainen lattia, reuna-alue: 1 m syvyydeltä mitattujen arvojen matalin maan lämpötila (Jokioinen 2004)								
	Yksiköt	maa	EPS	betoni			sisäpinta	
paksuus, d	[m]	-	0,15	0,08			-	
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	1,4	0,041	1,2			-	
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b	R_2	R_1			R_{si}	ΣR
		0,8	3,658537	0,066667			0,13	4,655203
lämmönvastuksien %-osuudet		17,2 %	78,6 %	1,4 %	0,0 %	0,0 %	2,8 %	100,0 %
pintalämpötila, T [°C]	13,2	14,5	19,6	19,6	19,6	19,6	19,7	21

Maan lämpötila, T_u [°C]	Koko rakenteen pintalämpötila, T [°C]	sisälämpötila, T_s [°C]
----------------------------	---------------------------------------	---------------------------

Maanvarainen lattia, sisäalue: 4 m syvyydeltä mitattujen arvojen matalin maan lämpötila (Jokioinen 2004)								
	Yksiköt	maa	EPS	betoni			sisäpinta	
paksuus, d	[m]	-	0,1	0,08			-	
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	1,4	0,041	1,2			-	
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b	R_2	R_1			R_{si}	ΣR
		3,2	2,439024	0,066667			0,13	5,835691
lämmönvastuksien %-osuudet		54,8 %	41,8 %	1,1 %	0,0 %	0,0 %	2,2 %	100,0 %
pintalämpötila, T [°C]	5,4	14,0	16,9	16,9	16,9	16,9	17,0	21

Maanvarainen lattia, sisäalue: 4 m syvyydeltä mitattujen arvojen korkein maan lämpötila (Jokioinen 2004)								
	Yksiköt	maa	EPS	betoni			sisäpinta	
paksuus, d	[m]	-	0,1	0,08			-	
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	1,4	0,041	1,2			-	
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b	R_2	R_1			R_{si}	ΣR
		3,2	2,439024	0,066667			0,13	5,835691
lämmönvastuksien %-osuudet		54,8 %	41,8 %	1,1 %	0,0 %	0,0 %	2,2 %	100,0 %
pintalämpötila, T [°C]	6,9	14,6	17,3	17,3	17,3	17,3	17,4	21

Sisäpinnan pintavastuksen käänteisluku
5,88

Seinän ulkopinnan pintavastuksen käänteisluku
(Ei huomioida maanvastaisissa rakenteissa)

0,04 m² · K/W -> 25 W/m² · K

TAPAUS C, lämpötila-alueiden vertailu: sokkeli

Maan lämpötila, T_u [°C]Koko rakenteen pintalämpötila, T [°C]sokkelin sisälämpötila, T_s [°C]

Sokkeli, reuna-alue: 0,5 m syvyydeltä mitattujen arvojen matalin maan lämpötila (Jokioinen 2004)								
	Yksiköt	maa	kevytsora	EPS				
paksuus, d	[m]	-	0,2	0,05				
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	2,3	0,13	0,041				
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b	R_2	R_1				ΣR
		0,4	1,538462	1,219512				3,157974
lämmönvastuksien %-osuudet		12,7 %	48,7 %	38,6 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %
pintalämpötila, T [°C]	0,2	0,8	2,8	3,6	3,6	3,6	3,6	4,8

Sokkeli, reuna-alue: 0,5 m syvyydeltä mitattujen arvojen korkein maan lämpötila (Jokioinen 2004)								
	Yksiköt	maa	kevytsora	EPS				
paksuus, d	[m]	-	0,2	0,05				
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	2,3	0,13	0,041				
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b	R_2	R_1				ΣR
		0,4	1,538462	1,219512				3,157974
lämmönvastuksien %-osuudet		12,7 %	48,7 %	38,6 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %
pintalämpötila, T [°C]	16,3	16,1	15,3	15,0	15,0	15,0	15,0	14,5

Maakerroksen paksuus vrt. lämmönvastus		
	Yksiköt	maa
paksuus, d	[m]	4,48
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	1,4
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b
		3,2

Maakerroksen paksuus vrt. lämmönvastus		
	Yksiköt	maa
paksuus, d	[m]	1,12
lämmönjohtavuus, λ	[W/(m · K)]	1,4
lämmönvastus, R	[(m ² · K)/W]	R_b
		0,8

10.08.2017

BETONIN VESIHÖYRYNVASTUS

$$\mu = \frac{\delta_{p,ilma}}{\delta_p} \text{ solve, } \delta_p \text{ @ } \frac{\delta_{p,ilma}}{\mu}$$

Yksikkömuunnokset (muutetaan mathcadin sisäisiä yksiköitä laskentaa vastaavaksi):

$$\text{kmol} := \text{mol} \times 10^3 \quad \frac{\text{g}}{\text{mol}} := \text{kg} \times 10^{-3} \quad h := 3600\text{s} \quad i := 1..4$$

Laskennassa käytettävät lähtöarvot:

Vesihöyryn molekyylipaino $M_{\nu} := 18.02 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$ Yleinen kaasuvakio $R_{kv} := 8314.3 \frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$

Tarkkailuhetken sisälämpötila $T_s := 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $\delta_{p,ilma} := 188 \times 10^{-12} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}$

Sisälämpötila Kelvineissä $T_{s,K} := (273.15 + T_s) \cdot \text{K} = 293.15 \text{ K}$

Vanha betoni ja sen vesisementtisuhte V/S = 0,6 [RIL 255-2014, liite 4 mukaan]:

$$x_1 = \text{Betoni, RH 35...70 \%} \quad x_2 = \text{Betoni, RH 70...80 \%} \quad x_3 = \text{Betoni, RH 80...90 \%} \quad x_4 = \text{Betoni, RH 90...95 \%}$$

Diffuusiovastuserroin [μ]:

$$\mu_1 := 127.1 \quad \mu_2 := 84.8 \quad \mu_3 := 31.8 \quad \mu_4 := 7.3$$

Rakennekerroksen paksuus [d]:

$$d_1 := t = 0.08 \text{ m} \quad d_2 := t = 0.08 \text{ m} \quad d_3 := t = 0.08 \text{ m} \quad d_4 := t = 0.08 \text{ m}$$

Suhteellinen diffuusiovastuserroin [S_d]:

$$S_{d_i} := \mu_i \cdot d_i$$

1	10.168	m
2	6.784	
3	2.544	
4	0.584	

Vesihöyryn läpäisevyys [δ_p ja δ_{ν}]:

$$\delta_{p_i} := \frac{\delta_{p,ilma}}{\mu_i}$$

1	1.479	$\times 10^{-12} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}$
2	2.217	
3	5.912	
4	25.753	

$\delta_{\nu_i} := \delta_{p_i} \times \frac{R_{kv}}{T_{s,K}} \times \frac{1}{M_{\nu}}$

arvot RIL 255-1-2014, LIITE 4 mukaan Taulukko: L4.14. ->

1	0.2	$\times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
2	0.3	
3	0.8	
4	3.5	

Vesihöyrynvastus [Z_{ν} ja Z_p]:

$$Z_{p_i} := \frac{d_i}{\delta_{p_i}}$$

1	5.409	$\times 10^{10} \frac{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}{\text{kg}}$
2	3.609	
3	1.353	
4	0.311	

$$Z_{\nu_i} := \frac{d_i}{\delta_{\nu_i}}$$

1	399.9	$\times 10^3 \frac{\text{s}}{\text{m}}$
2	266.8	
3	100	
4	23	

10.08.2017

Vesihöyrynläpäisykerroin [W_v ja W_p]:

$$W_{P_i} := \frac{1}{Z_{P_i}}$$

$$W_{P_i} = \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline 2 \\ \hline 3 \\ \hline 4 \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline 18.489 \\ \hline 27.712 \\ \hline 73.899 \\ \hline 321.918 \\ \hline \end{array} \times 10^{-12} \times \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}$$

$$W_{v_i} := \frac{1}{Z_{v_i}}$$

$$W_{v_i} = \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline 2 \\ \hline 3 \\ \hline 4 \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline 2.501 \\ \hline 3.748 \\ \hline 9.995 \\ \hline 43.542 \\ \hline \end{array} \times 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

10.08.2017

KAPSELOINTIEPOKSIEN VESIHÖYRYNVASTUUKSIEN VERTAILUA

$$\mu = \frac{\delta_{p,ilma}}{\delta_p} \text{ solve, } \delta_p \text{ @ } \frac{\delta_{p,ilma}}{\mu}$$

Yksikkömuunnokset (muutetaan mathcadin sisäisiä yksiköitä laskentaa vastaavaksi):

$$\text{kmol} := \text{mol} \times 10^3 \quad \frac{\text{g}}{\text{mm}^3} := \text{kg} \times 10^{-3} \quad h := 3600\text{s} \quad i := 1..4$$

Laskennassa käytettävät lähtöarvot:

Vesihöyryn molekyylipaino $M_{\nu} := 18.02 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$ Yleinen kaasuvakio $R_{kv} := 8314.3 \frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$

Tarkkailuhetken sisälämpötila $T_s := 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $\delta_{p,ilma} := 188 \times 10^{-12} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{Pa}}$

Sisälämpötila Kelvineissä $T_{s,K} := (273.15 + T_s) \cdot \text{K} = 293.15 \text{ K}$

Kapselointiepoksien vertailu:

x_1 = weber.floor 4712, tiivistysepoksi x_2 = weber.floor 4712, vertailu 1 mm kerr. x_3 = Ardex, EP2000, kapselointiepoksi x_4 = Ardex, EP2000, vertailu 1 mm kerroksena

Diffuusiovastuskerroin [μ]:

$$\mu_1 := 1366 \quad \mu_2 := 820 \quad \mu_3 := 270600 \quad \mu_4 := 128800$$

Rakennekerroksen paksuus [d]:

$$d_1 := 0.6\text{mm} \quad d_2 := 1\text{mm} \quad d_3 := 0.5\text{mm} \quad d_4 := 1\text{mm}$$

Suhteellinen diffuusiovastuskerroin [S_d]:

$$S_{d_i} := \mu_i \cdot d_i \quad S_{d_i} =$$

Weberin Sisäilmakorjaustuotteiden vesihöyrynläpäisevyydet, 15.4.2016 mukaan ->

ARDEX Vesihöyryn läpäisevyys, annetun arvon mukaan ->

1	0.82	m
2	0.82	
3	135.3	
4	128.8	

Vesihöyryn läpäisevyys [δ_p ja δ_{ν}]:

$$\delta_{p_i} := \frac{\delta_{p,ilma}}{\mu_i}$$

$$\delta_{p_i} =$$

$$\delta_{\nu_i} := \delta_{p_i} \times \frac{R_{kv}}{e \cdot M_{\nu}} \times T_{s,K} \quad \delta_{\nu_i} =$$

$$\times 10^{-12} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{Pa}}$$

1	0.138
2	0.229
3	0.001
4	0.001

$$\times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

1	0.0186
2	0.031
3	0.0001
4	0.0002

Vesihöyrynvastus [Z_{ν} ja Z_p]:

$$Z_{p_i} := \frac{d_i}{\delta_{p_i}}$$

$$Z_{p_i} =$$

$$Z_{\nu_i} := \frac{d_i}{\delta_{\nu_i}}$$

$$Z_{\nu_i} =$$

$$\times 10^{10} \frac{\text{m}^2 \cdot \text{Pa}}{\text{kg}}$$

1	0.436
2	0.436
3	71.968
4	68.511

$$\times 10^3 \frac{\text{s}}{\text{m}}$$

1	32.2
2	32.2
3	5320.8
4	5065.2

10.08.2017

Vesihöyrynläpäisykerroin [W_v ja W_p]:

$$W_{p_i} := \frac{1}{Z_{p_i}}$$

$$W_{p_i} =$$

$$W_{v_i} := \frac{1}{Z_{v_i}}$$

$$W_{v_i} =$$

ARDEX Vesihöyrynläpäisevyys, annetun arvon mukaan ->

1	229.38	$\times 10^{-12} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}$
2	229.268	
3	1.39	
4	1.46	

1	31.025	$\times 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}}$
2	31.01	
3	0.188	
4	0.197	

10.11.2018

$$\mu = \frac{\delta_{p,\text{ilma}}}{\delta_p} \text{ solve, } \delta_p \rightarrow \frac{\delta_{p,\text{ilma}}}{\mu}$$

$$i := 1..6 \quad \text{kmol} := \text{mol} \cdot 10^3$$

$$g := \text{kg} \cdot 10^{-3} \quad h := 3600\text{s}$$

Tarkkailuhetken sisälämpötila

$$t_s := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Yleinen kaasuvakio

$$R_{kv} := 8314.3 \frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$$

Sisälämpötila Kelvineissä

$$T_{s,K} := (273.15 + t_s) \cdot \text{K} = 293.15 \text{ K}$$

Vesihöyryn molekyylipaino

$$M_v := 18.02 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

RIL 107-1989, s.56 mukaan

$$K_{p3} := 14 \cdot 10^{-15} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}$$

$$K_{c3} := \frac{R_{kv} \cdot T_{s,K}}{M_v} \cdot K_{p3}$$

$$K_{p4} := 0.4 \cdot 10^{-15} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}$$

$$K_{c4} := \frac{R_{kv} \cdot T_{s,K}}{M_v} \cdot K_{p4}$$

$$K_{p5} := 2 \cdot 10^{-15} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}$$

$$K_{c5} := \frac{R_{kv} \cdot T_{s,K}}{M_v} \cdot K_{p5}$$

$$\delta_{p,\text{ilma}} := 188 \cdot 10^{-12} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}$$

Vertaillaan bitumikerrosten rakennekerroksen vesihöyryvastuksia:

- 1 = Bitumikerros [Björkholtz 2004, 56], alaraja
- 2 = Bitumikerros [Björkholtz 2004, 56], yläraja
- 3 = Bitumiemulsiokerros [RIL 107-1989, s.56], minimi
- 4 = Siveltävä bitumiliuos [RIL 107-1989, s.56], yläraja
- 5 = Siveltävä bitumiliuos [RIL 107-1989, s.56], alaraja
- 6 = Bitumisively vertailu

$$\mu_1 := 18800 \quad d_1 := 5\text{mm}$$

$$\mu_2 := 37600 \quad d_2 := 5\text{mm}$$

$$\mu_3 := 13450 \quad d_3 := 7\text{mm}$$

$$\mu_4 := 500000 \quad d_4 := 1\text{mm}$$

$$\mu_5 := 95000 \quad d_5 := 2\text{mm}$$

$$\mu_6 := 75000 \quad d_6 := 1\text{mm}$$

$$K_{c3} = 0.00189 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$K_{c4} = 0.00005 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$K_{c5} = 0.00027 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\delta_{p_i} := \frac{\delta_{p,\text{ilma}}}{\mu_i} = \dots \cdot 10^{-12} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}$$

$$\delta_{v_i} := \delta_{p_i} \cdot \left(\frac{R_{kv}}{M_v} \right) \cdot T_{s,K} = \dots \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$S_{d_i} := \mu_i \cdot d_i = \dots \cdot \text{m}$$

$\delta_{p_i} =$

1	0.01	$\cdot 10^{-12} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}$
2	0.005	
3	0.014	
4	0	
5	0.002	
6	0.003	

$\delta_{v_i} =$

Vrt ->
K_c-arvot

1	0.00135	$\cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
2	0.00068	
3	0.00189	
4	0.00005	
5	0.00027	
6	0.00034	

$S_{d_i} =$

1	94	m
2	188	
3	94.15	
4	500	
5	190	
6	75	

10.11.2018

Vesihöyrynvastus [Z_v ja Z_p]:

$$Z_{p_i} := \frac{d_i}{\delta_{p_i}} = \dots \cdot 10^9 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}{\text{kg}}$$

$$Z_{p_i} =$$

$$Z_{v_i} := \frac{d_i}{\delta_{v_i}} = \dots \cdot 10^3 \frac{\text{s}}{\text{m}}$$

$$Z_{v_i} =$$

Bitumikerros
(Björkholtz, 50...100) ->

1	50
2	100
3	50
4	266
5	101
6	40

 $\cdot 10^{-10} \frac{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}{\text{kg}}$

1	3697
2	7393
3	3703
4	19663
5	7472
6	2949

 $\cdot 10^3 \frac{\text{s}}{\text{m}}$
Vesihöyrynläpäisykerroin [W_v ja W_p]:

$$W_{p_i} := \frac{1}{Z_{p_i}}$$

$$W_{p_i} =$$

$$W_{v_i} := \frac{1}{Z_{v_i}}$$

$$W_{v_i} =$$

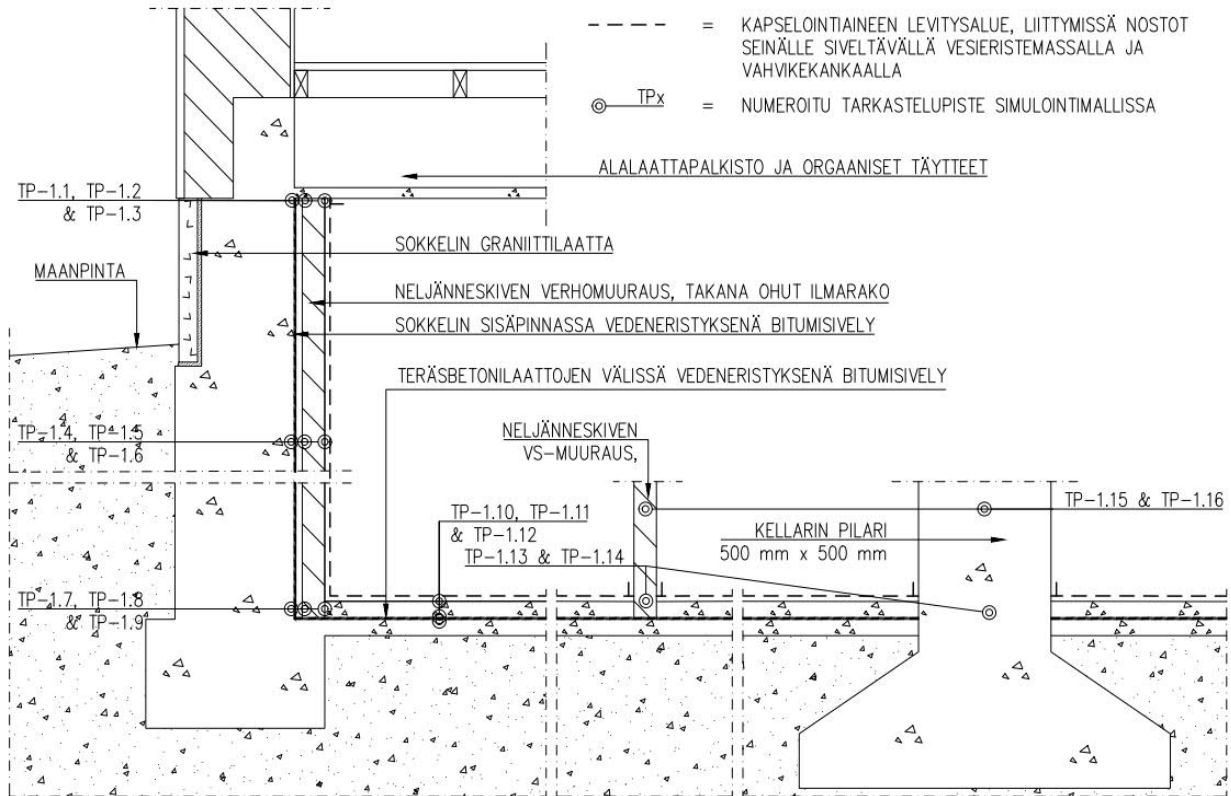
1	2
2	1
3	1.997
4	0.376
5	0.989
6	2.507

 $\cdot 10^{-12} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}$

1	0.271
2	0.135
3	0.27
4	0.051
5	0.134
6	0.339

 $\cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Kuvaus rakenteesta:



Homeindeksin tarkastelu WUFI Pro
VTT ja TTY suomalainen homemalli

Rakennusfysikaalinen testivuosi
Jokioinen 2004

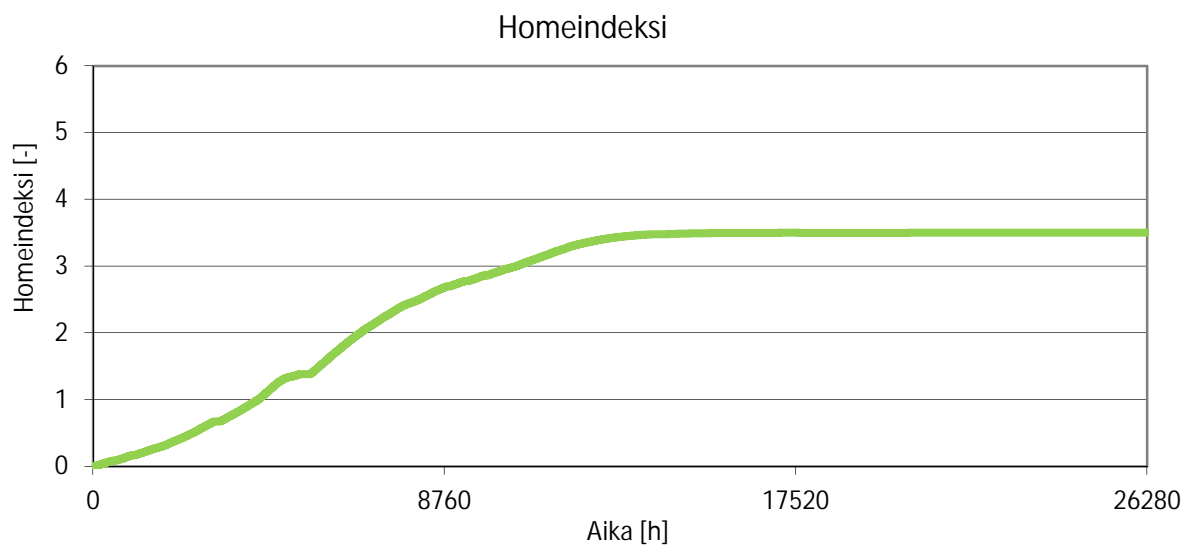
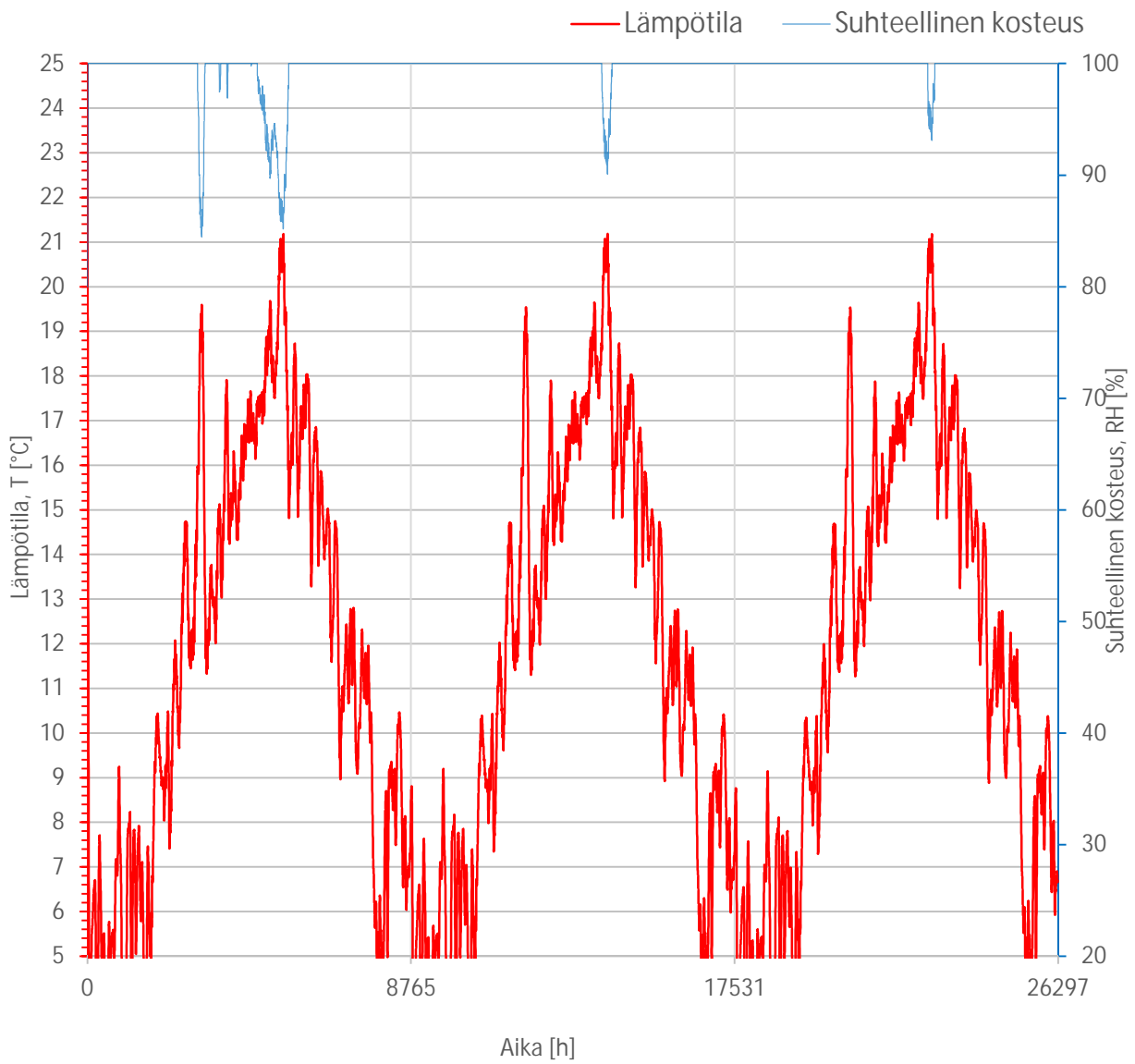
Tarkastelupiste	Tarkastelupiste- teen rakennus- materiaalit	Kasvunopeu- den herkkyys- luokka	Homeen maksi- mimäärän herk- kyysluokka	Taantuma- luokka [C _{mat}]	Homeindeksi [M _{max}]
TP-1 .01	bitumi ilmatila	3	3	0,25	M = 3,5
TP-1 .02	ilmatila tiili	3	3	0,25	M = 0,292
TP-1 .03	tiili kapselointi	3	3	0,25	M = 0,03
TP-1 .04	bitumi ilmatila	3	3	0,25	M = 3,5
TP-1 .05	ilmatila tiili	3	3	0,25	M = 0,036
TP-1 .06	tiili kapselointi	3	3	0,25	M = 0

Herkkyysluokitus	Kuvaus
hyvin herkkä	HHL 1 käsittelemätön, runsaasti ravinteita sisältävä puu
herkkä	HHL 2 höylätty puu, paperipintaiset tuotteet ja kalvot, puupohjaiset levyt
koht. kestävä	HHL 3 sementtipohjaiset materiaalit, muovipohjaiset materiaalit, mineraalivillat
kestävä	HHL 4 lasi- ja metallimateriaalit, tehokkaita suoja-aineita sisältävät tuotteet

Tarkastelupiste:

TP-1 .01

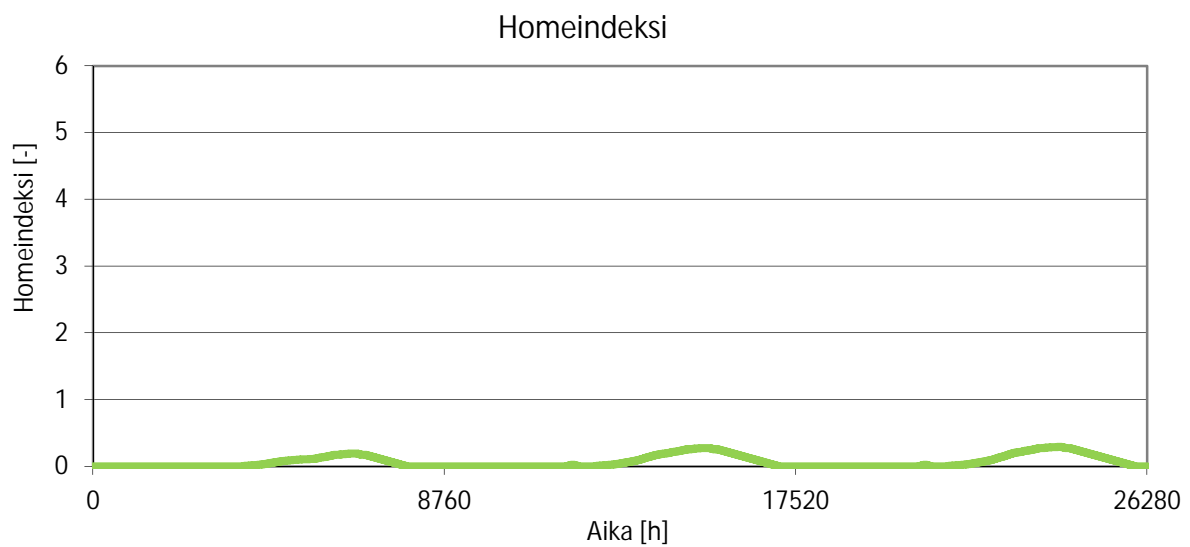
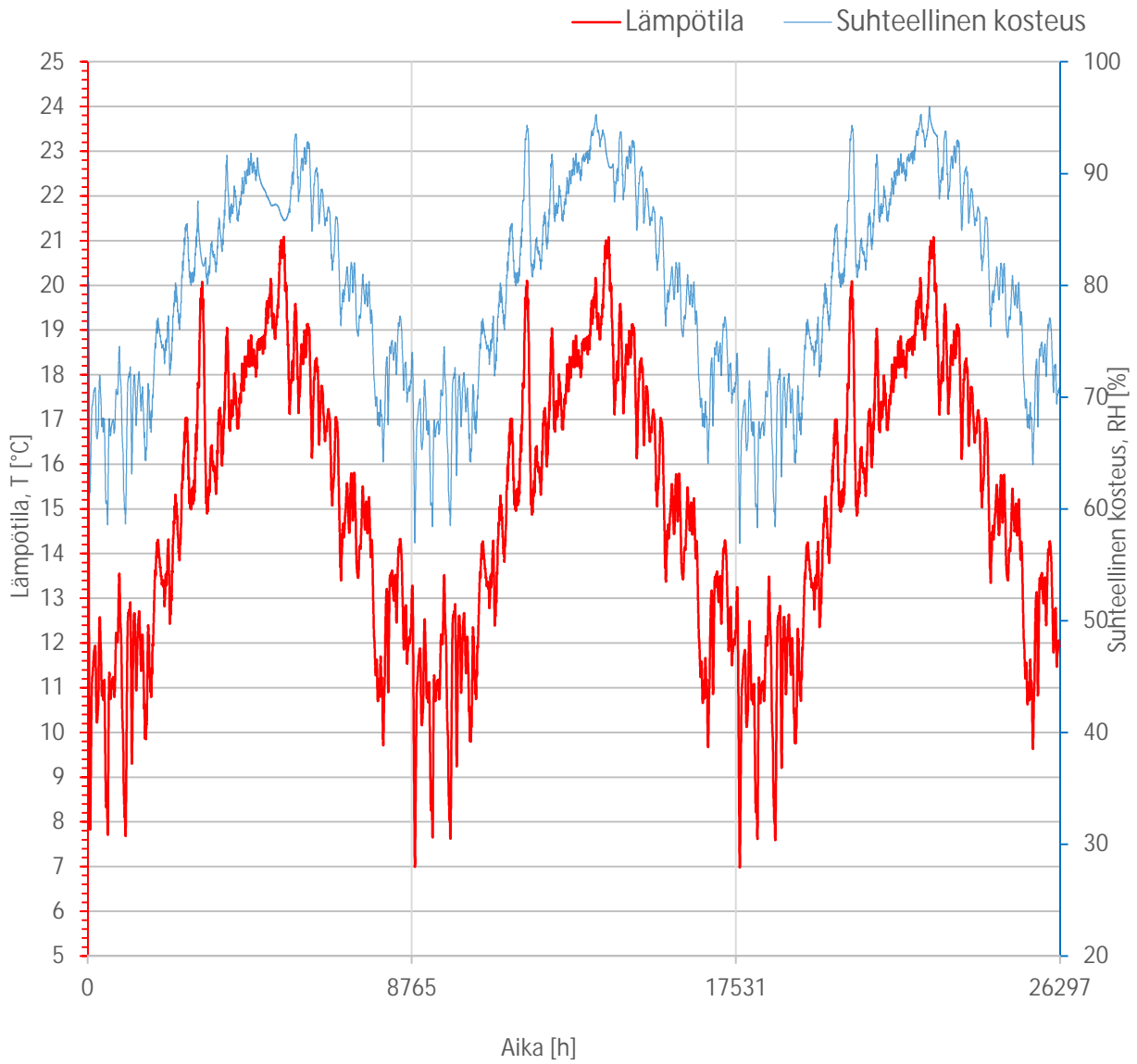
Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



Tarkastelupiste:

TP-1 .02

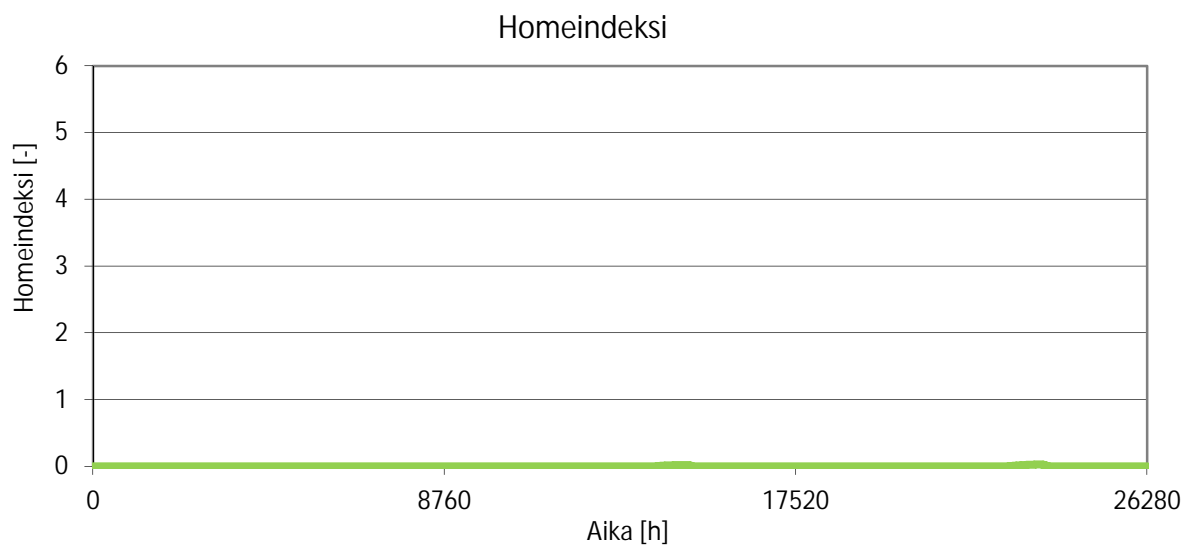
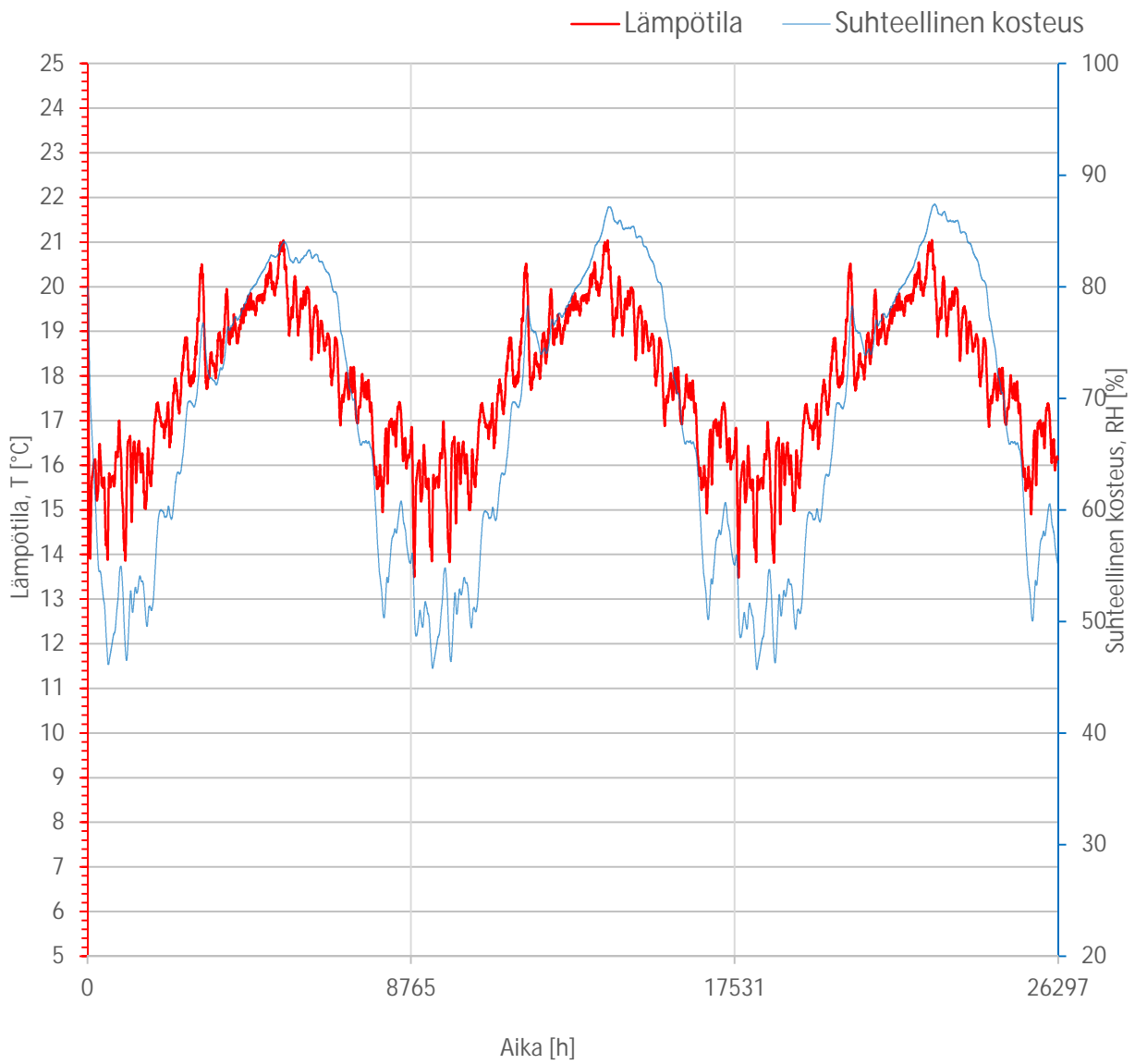
Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



Tarkastelupiste:

TP-1 .03

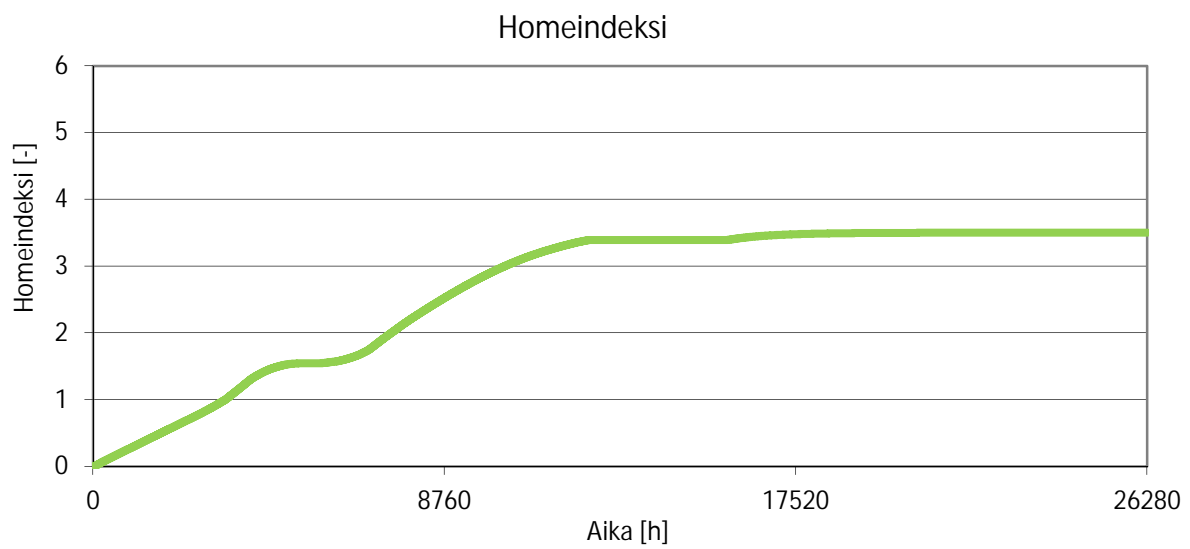
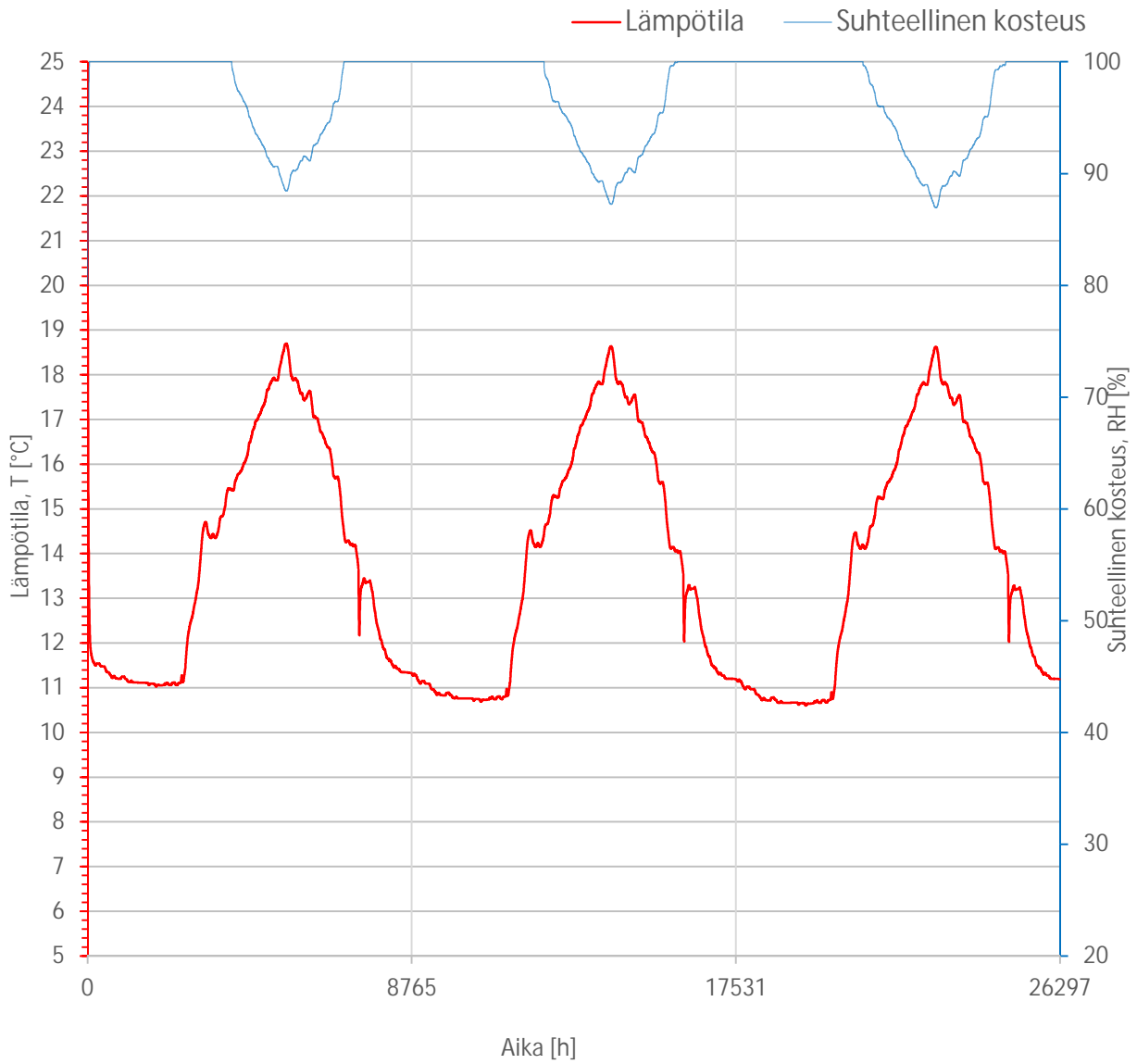
Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



Tarkastelupiste:

TP-1 .04

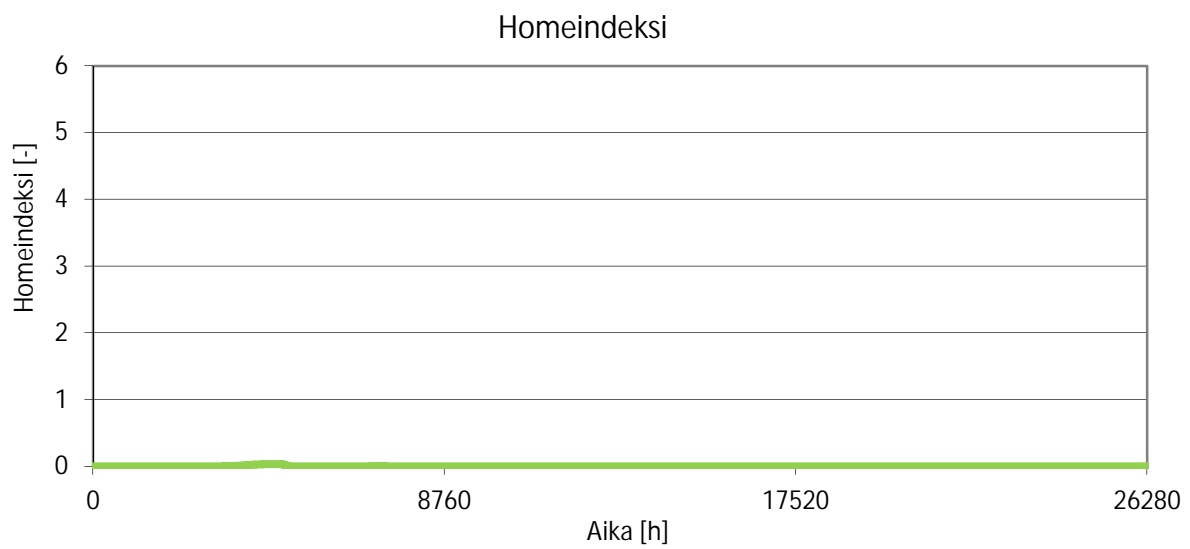
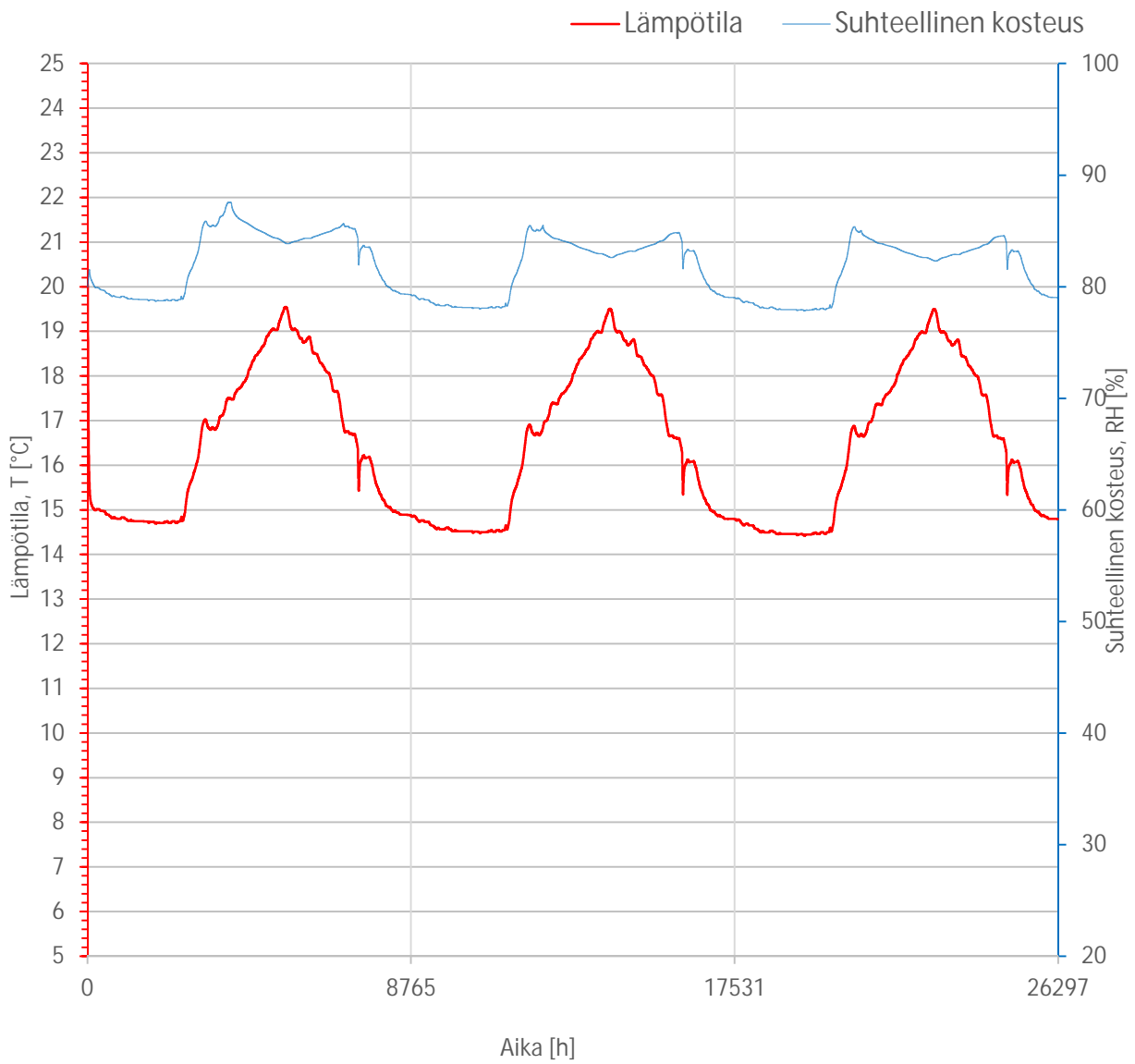
Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



Tarkastelupiste:

TP-1 .05

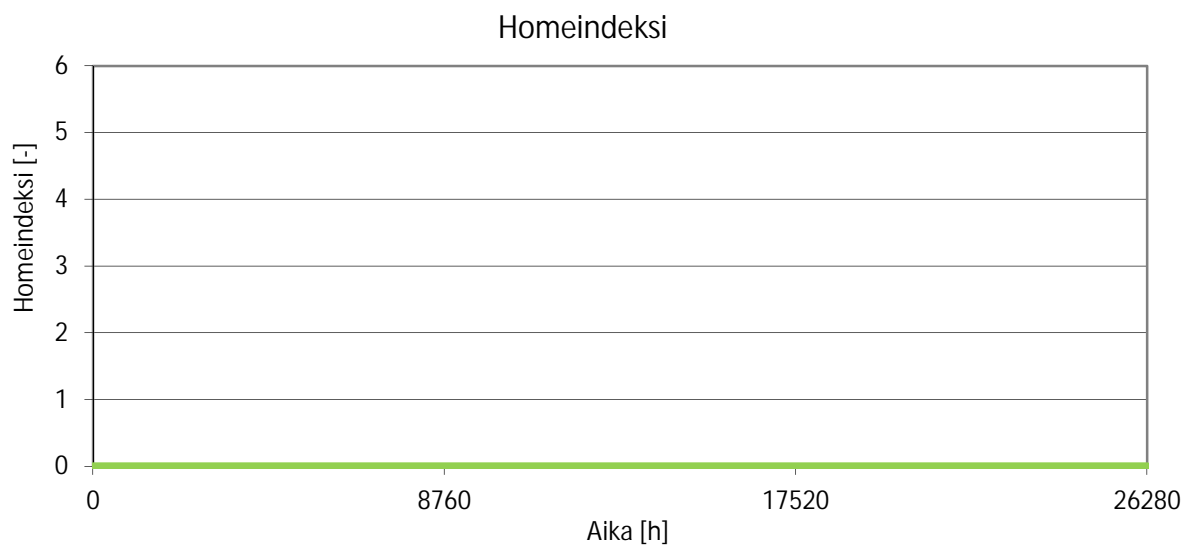
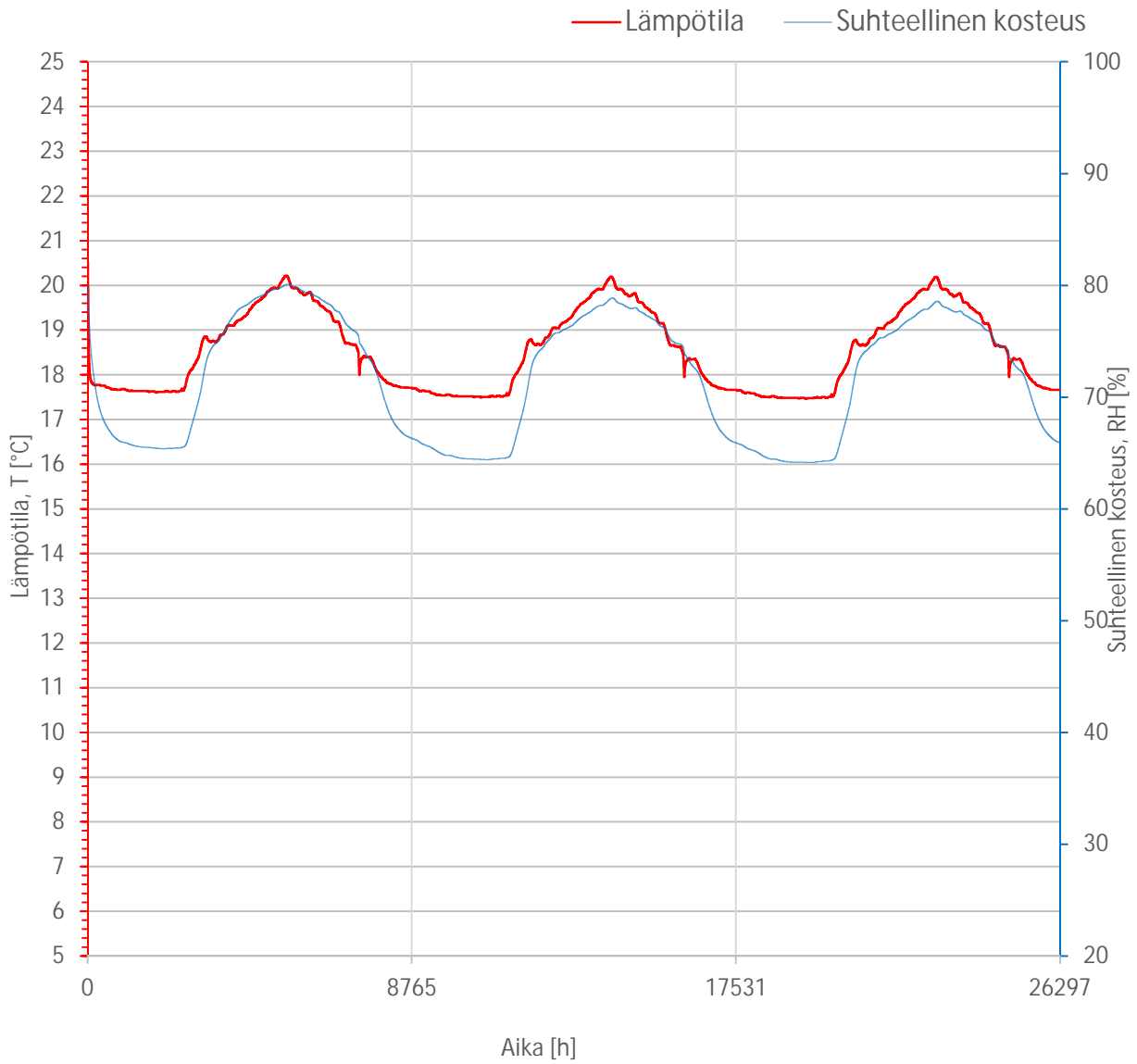
Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



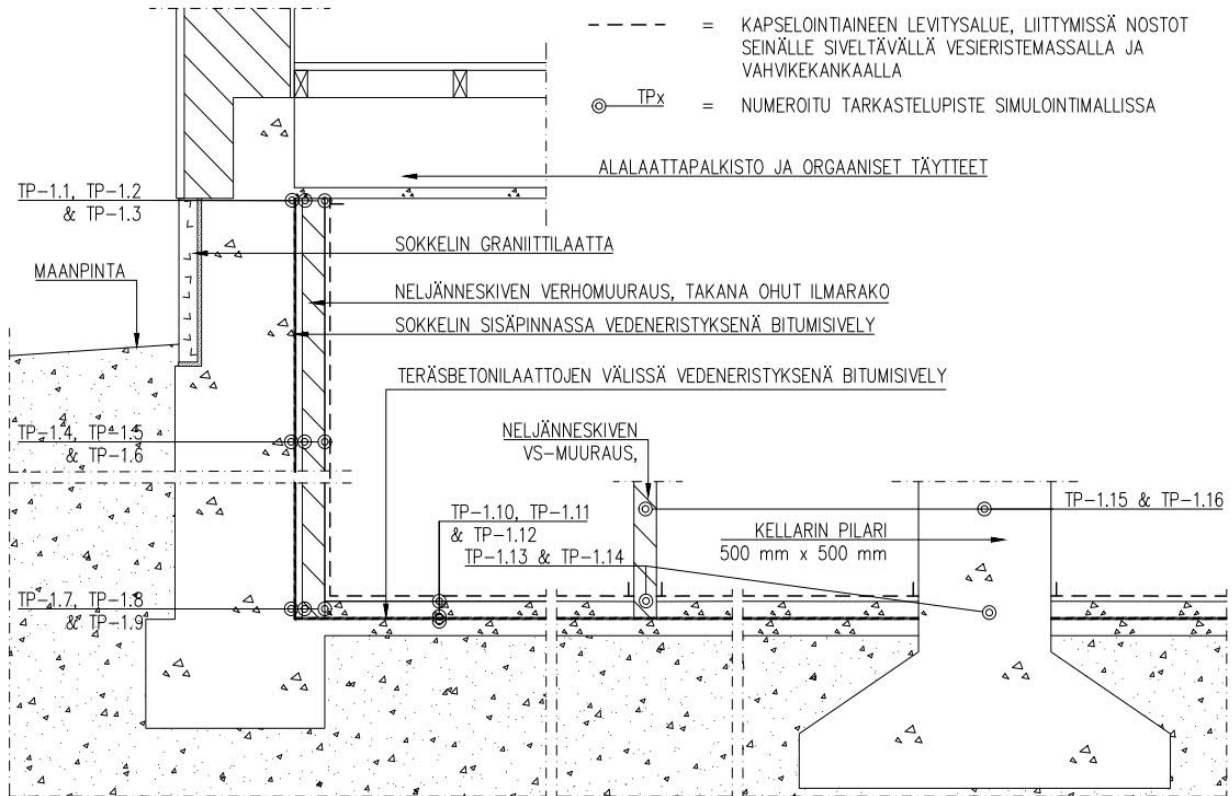
Tarkastelupiste:

TP-1 .06

Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



Kuvaus rakenteesta:



Homeindeksin tarkastelu WUFI Pro
VTT ja TTY suomalainen homemalli

Rakennusfysikaalinen testivuosi
Jokioinen 2004

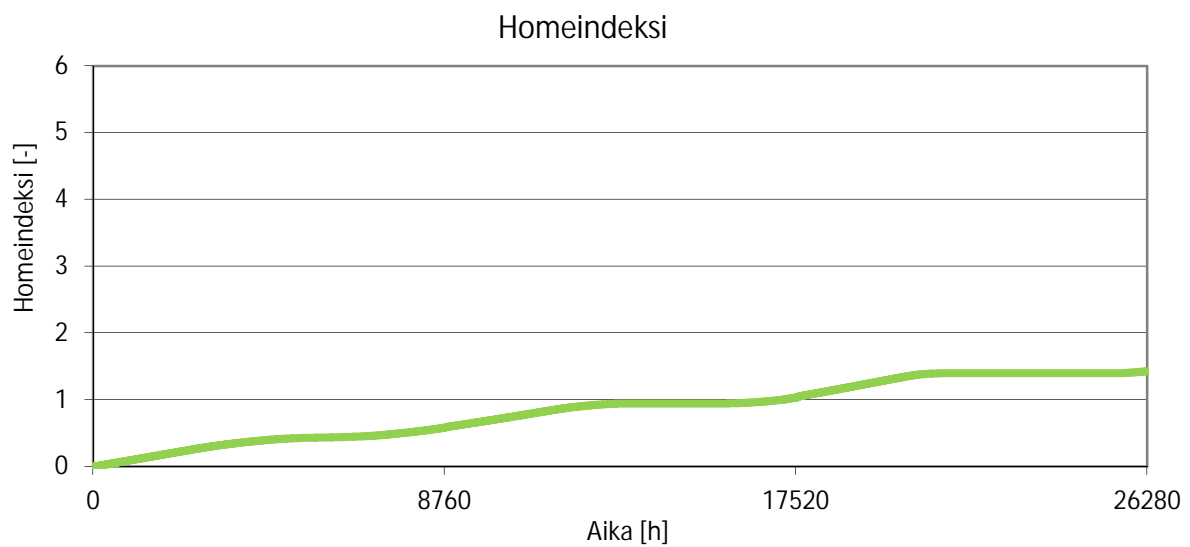
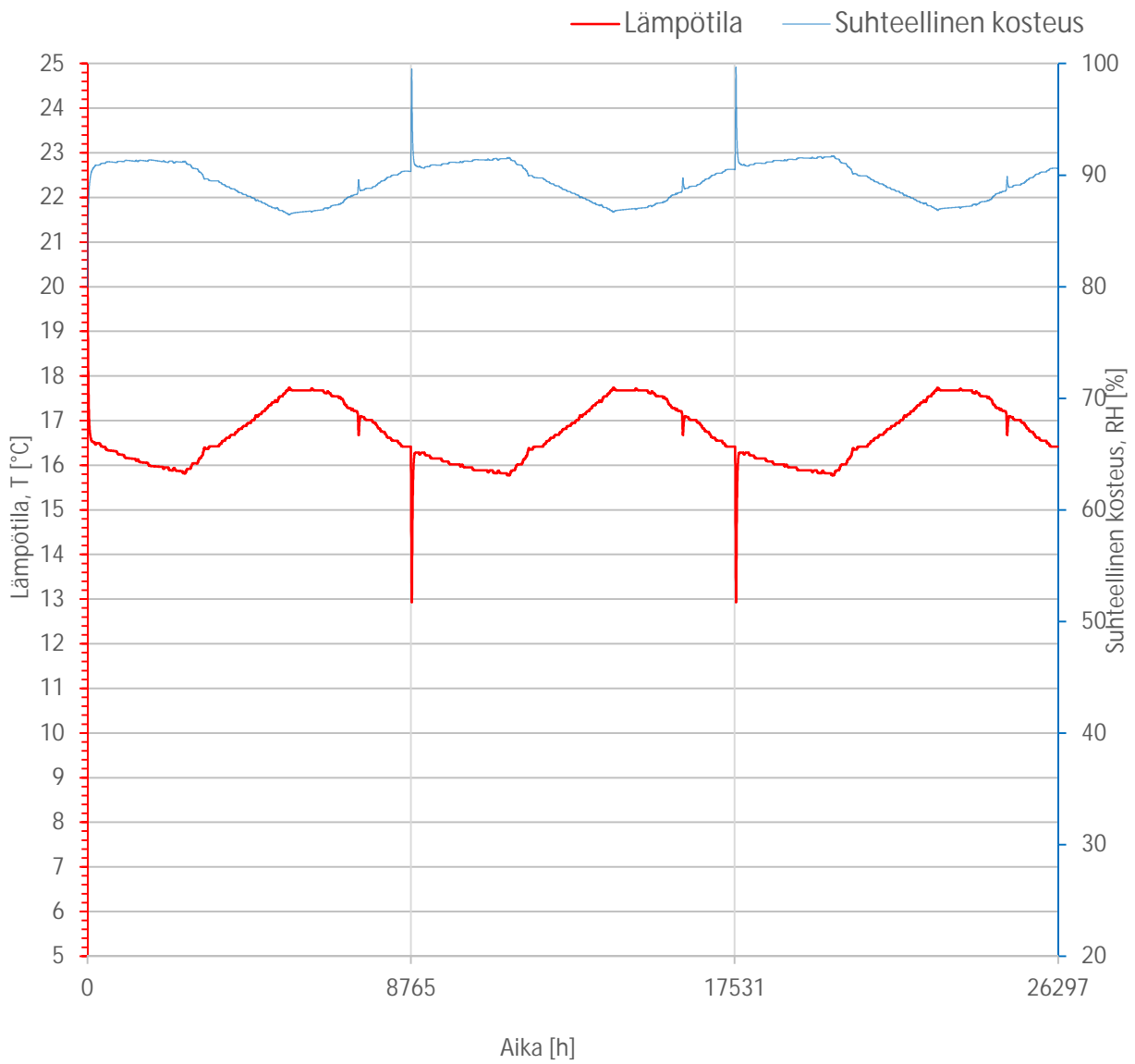
Tarkastelupiste	Tarkastelupiste- teen rakennus- materiaalit	Kasvunopeu- den herkkyys- luokka	Homeen maksi- mimäärän herk- kyysluokka	Taantuma- luokka [C _{mat}]	Homeindeksi [M _{max}]
TP-1 .07	bitumi	3	3	0,25	M = 1,425
	ilmatila				
TP-1 .08	ilmatila	3	3	0,25	M = 0
	tiili				
TP-1 .09	tiili	3	3	0,25	M = 0
	kapselointi				
TP-1 .10	betoni	3	3	0,25	M = 3,5
	bitumi				
TP-1 .11	bitumi	3	3	0,25	M = 0
	betoni				
TP-1 .12	betoni	3	3	0,25	M = 0
	kapselointi				

Herkkyysluokitus	Kuvaus
hyvin herkkä	HHL 1 käsittelemätön, runsaasti ravinteita sisältävä puu
herkkä	HHL 2 höylätty puu, paperipintaiset tuotteet ja kalvot, puupohjaiset levyt
koht. kestävä	HHL 3 sementtipohjaiset materiaalit, muovipohjaiset materiaalit, mineraalivillat
kestävä	HHL 4 lasi- ja metallimateriaalit, tehokkaita suoja-aineita sisältävät tuotteet

Tarkastelupiste:

TP-1 .07

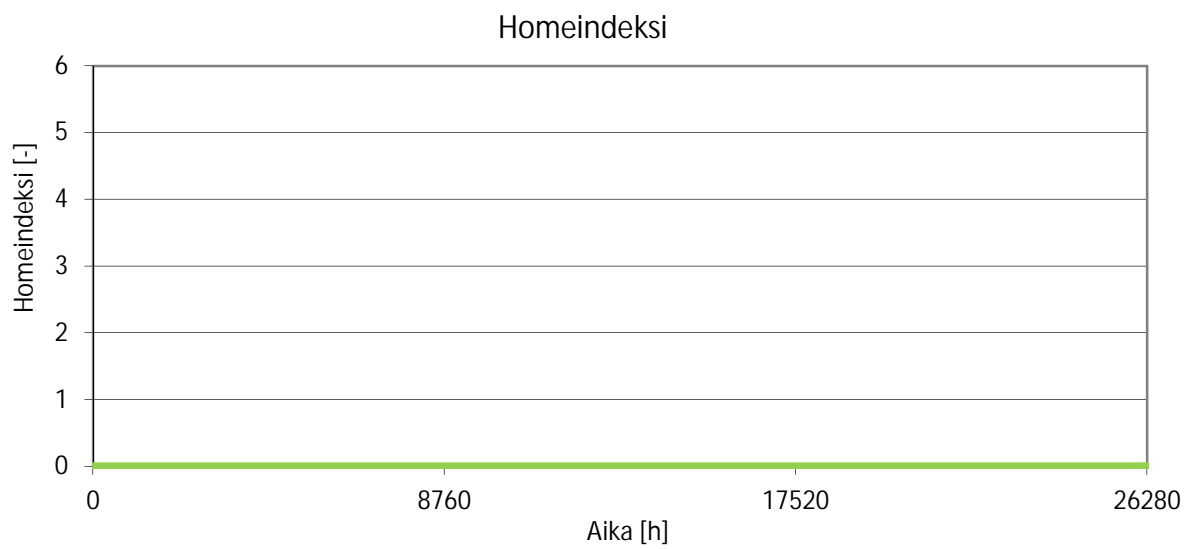
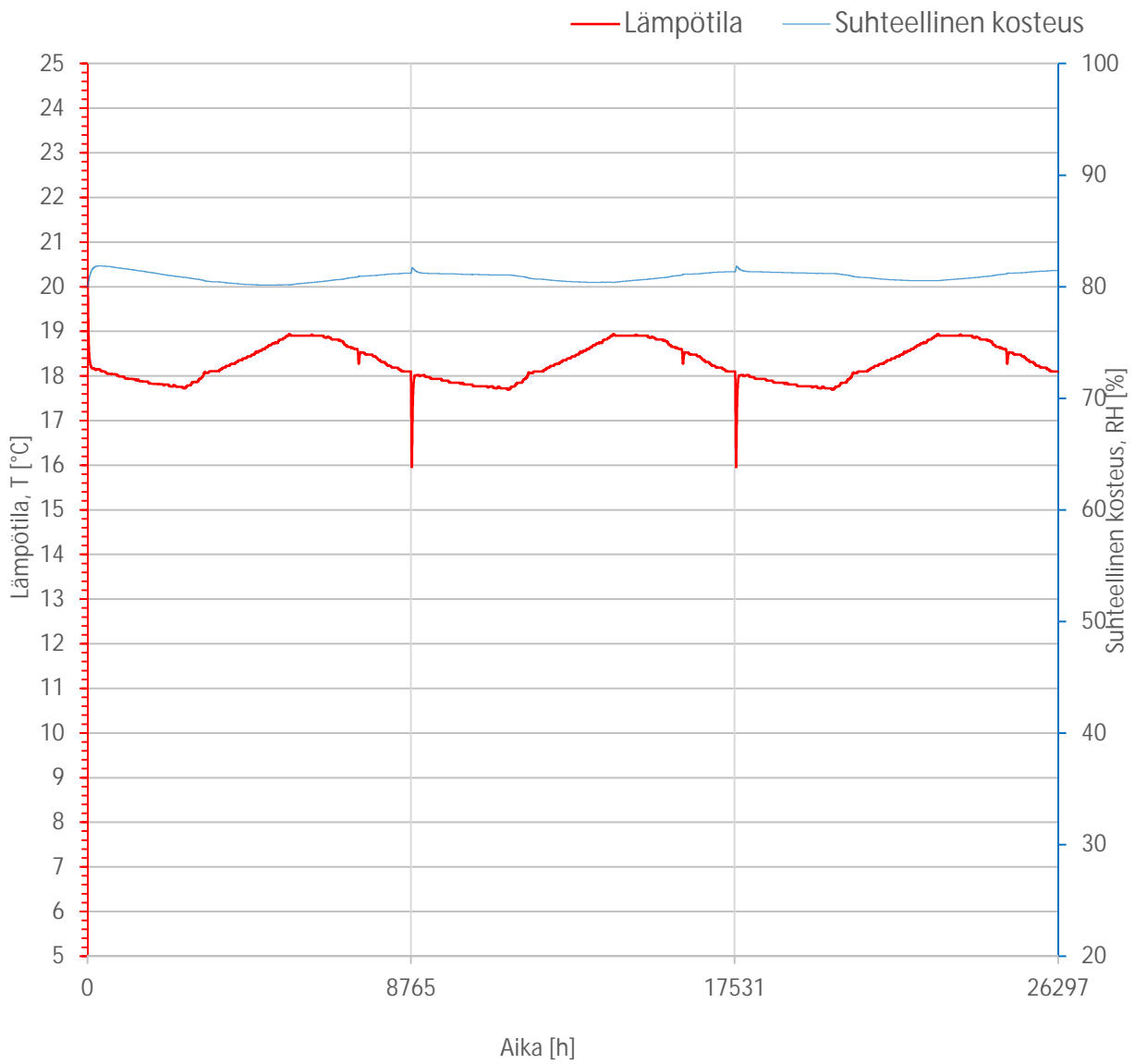
Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



Tarkastelupiste:

TP-1 .08

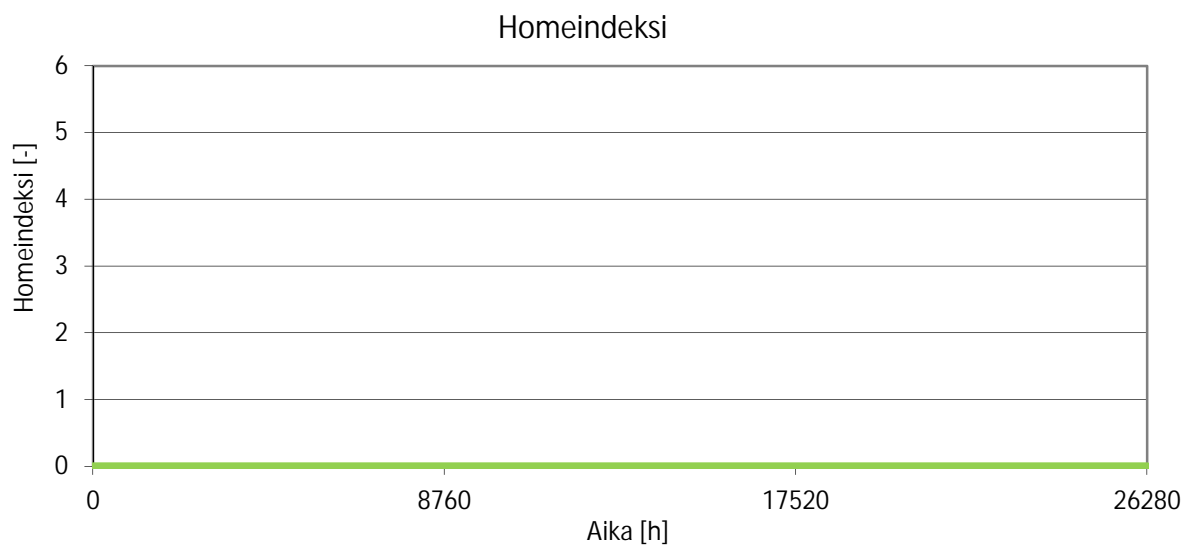
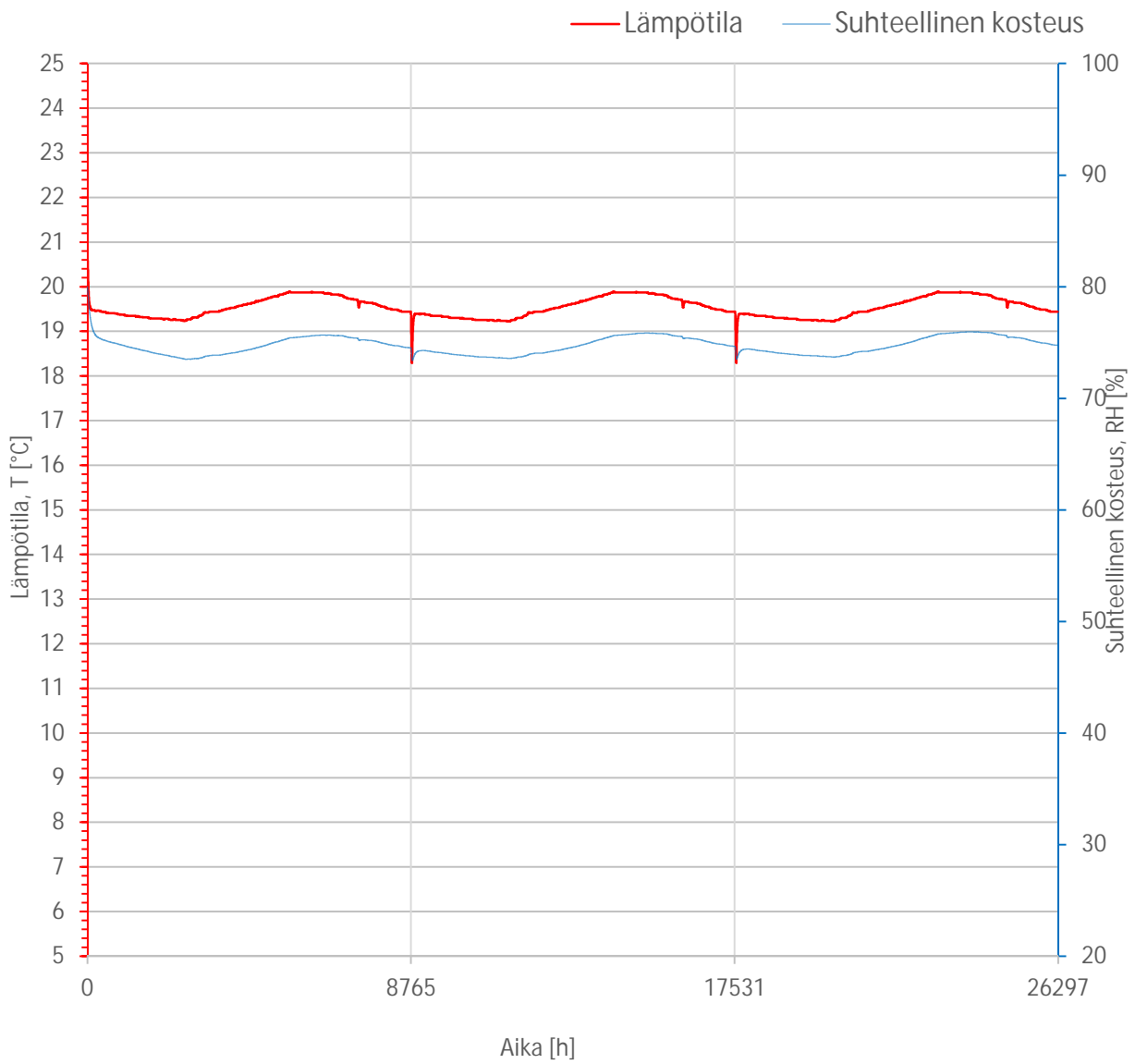
Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



Tarkastelupiste:

TP-1 .09

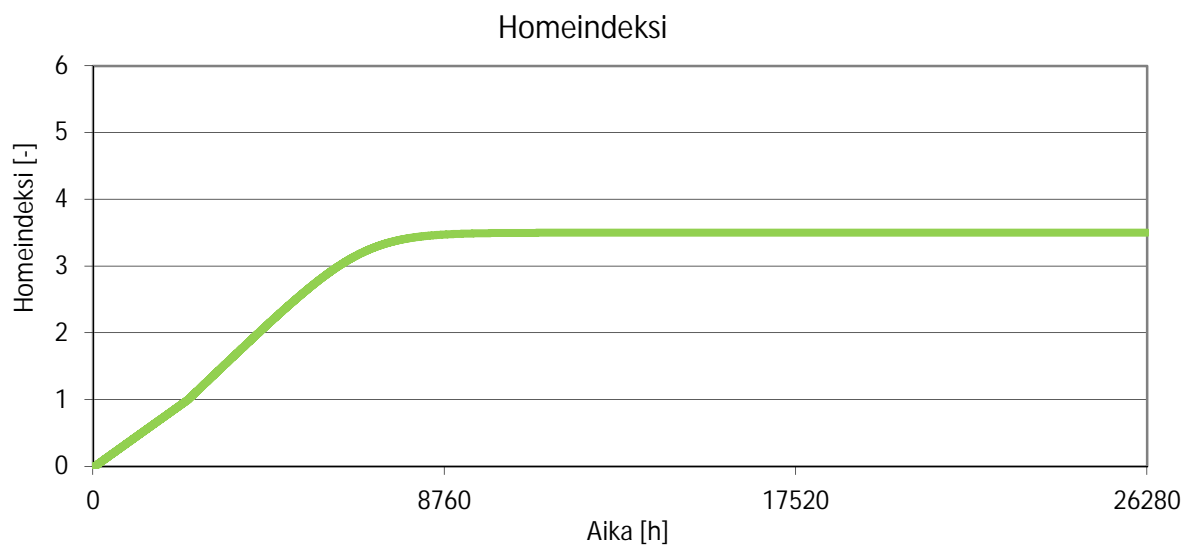
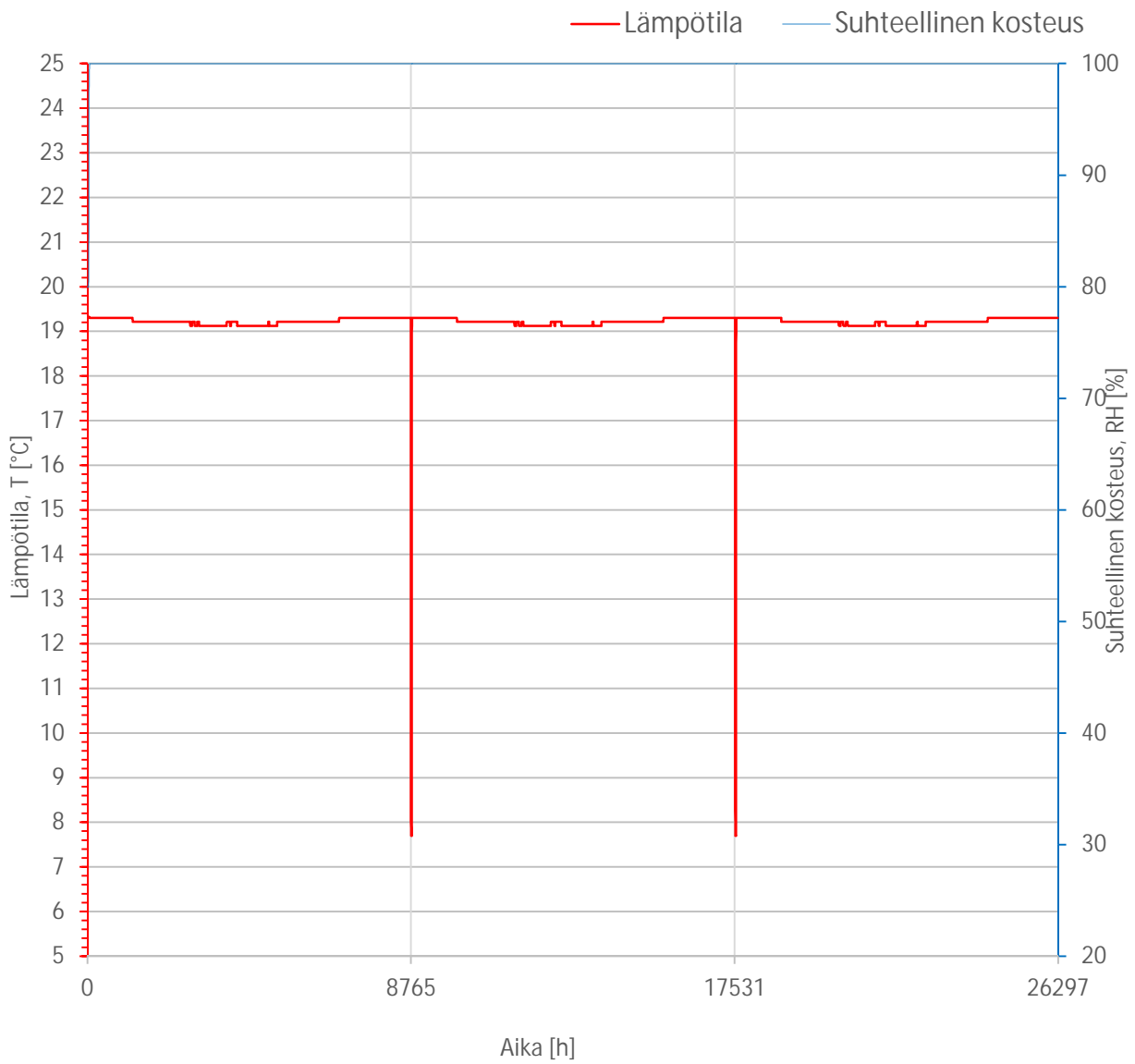
Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



Tarkastelupiste:

TP-1 .10

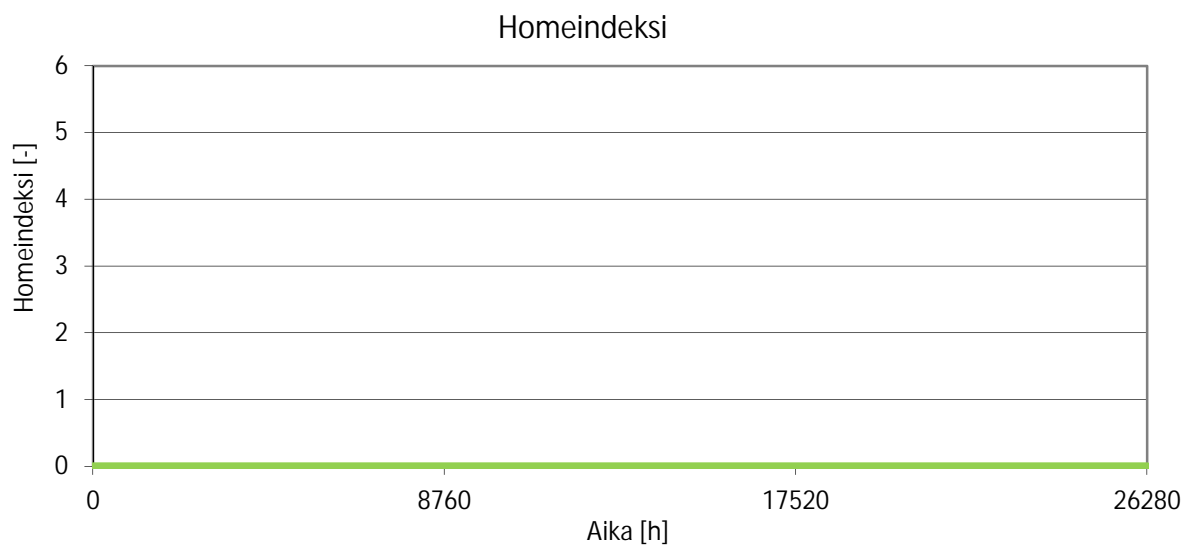
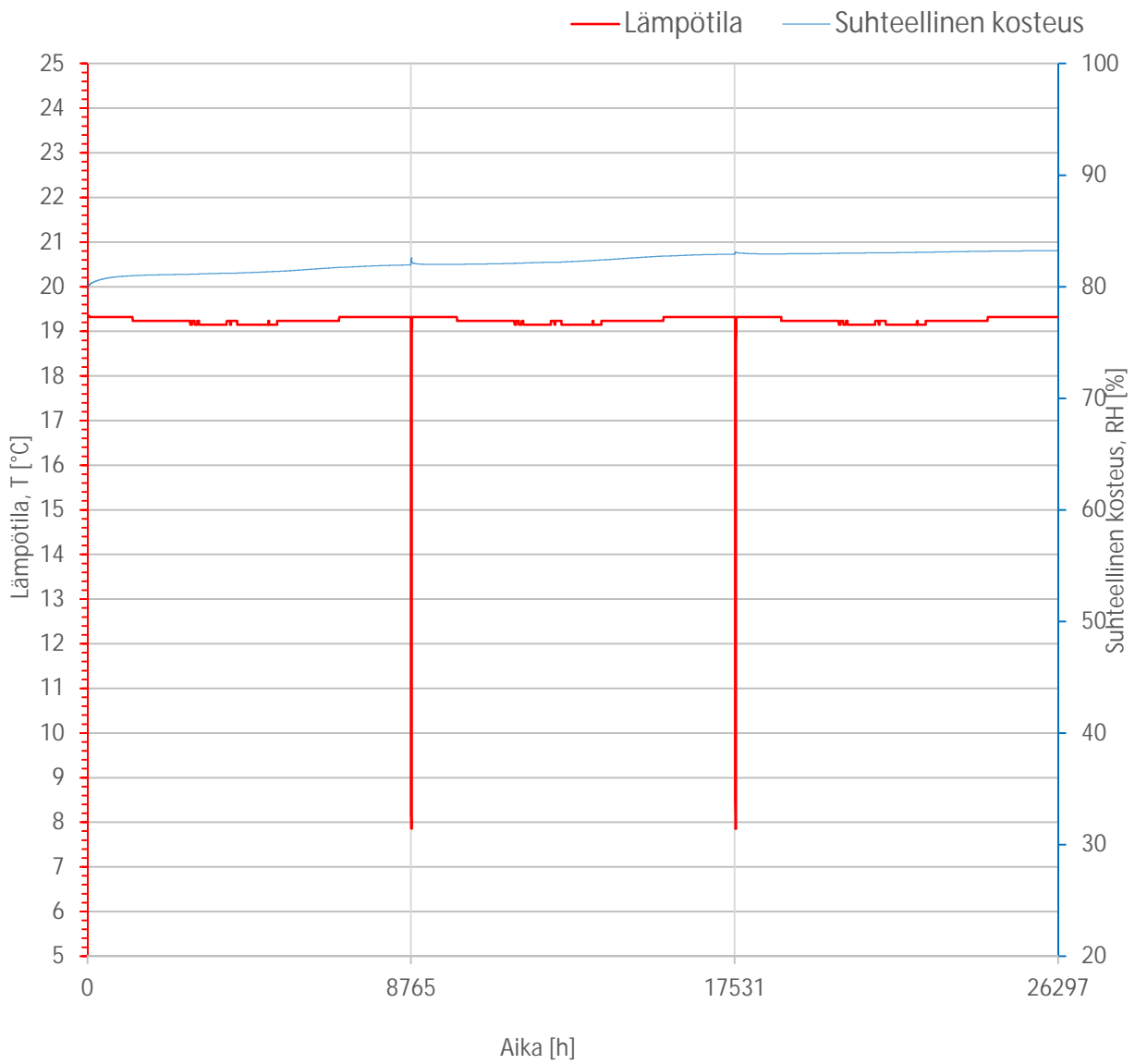
Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



Tarkastelupiste:

TP-1 .11

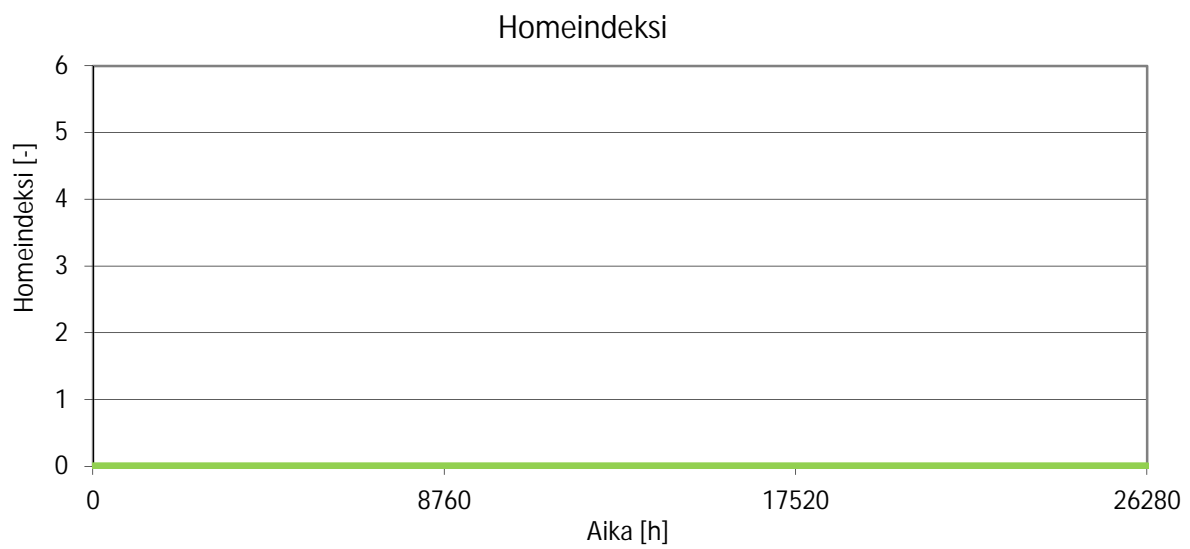
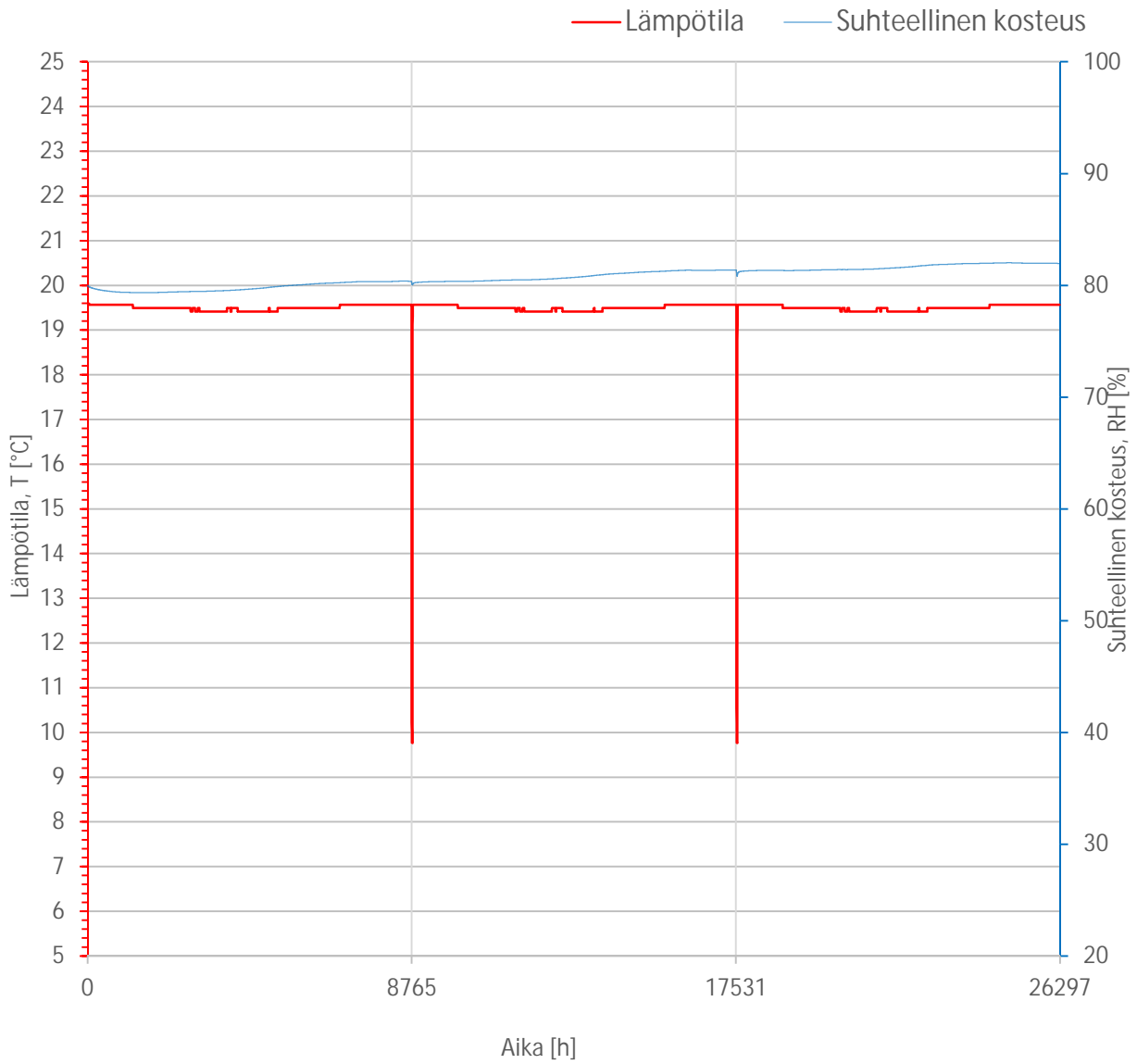
Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



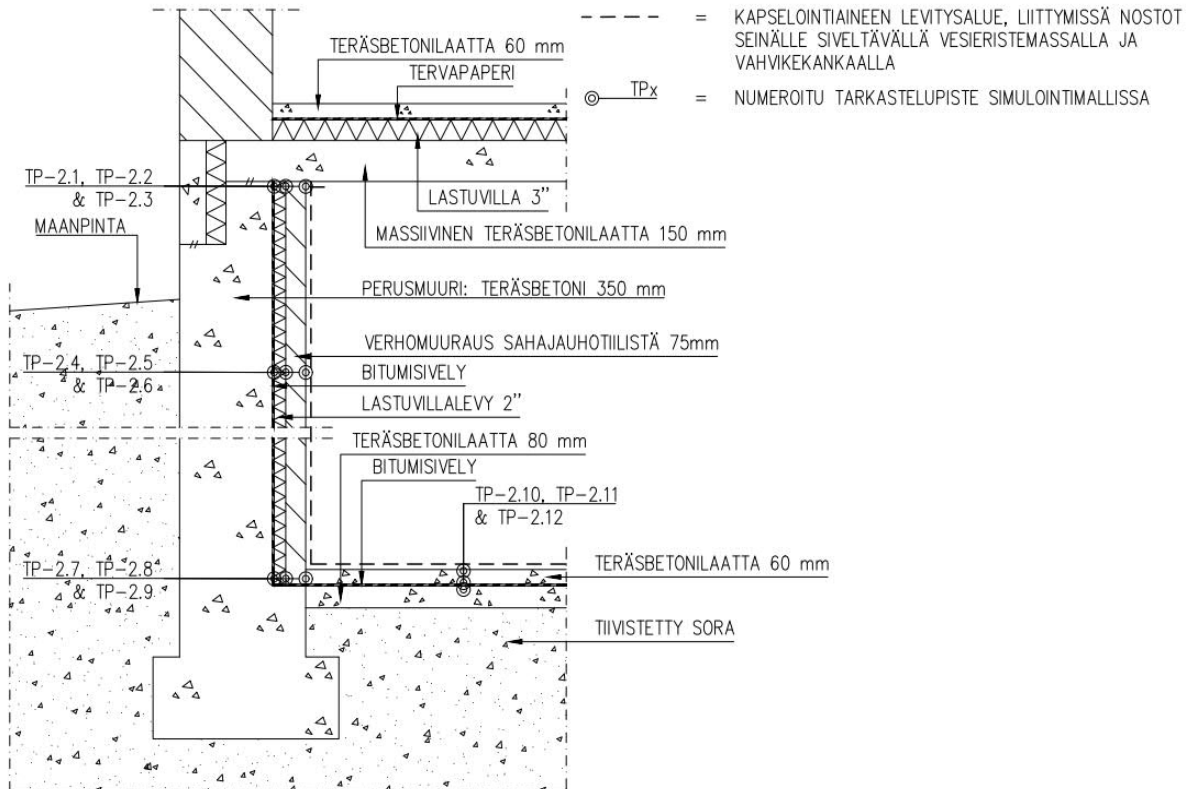
Tarkastelupiste:

TP-1 .12

Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



Kuvaus rakenteesta:



Homeindeksin tarkastelu WUFI Pro
 VTT ja TTY suomalainen homemalli

Rakennusfysikaalinen testivuosi
 Jokioinen 2004

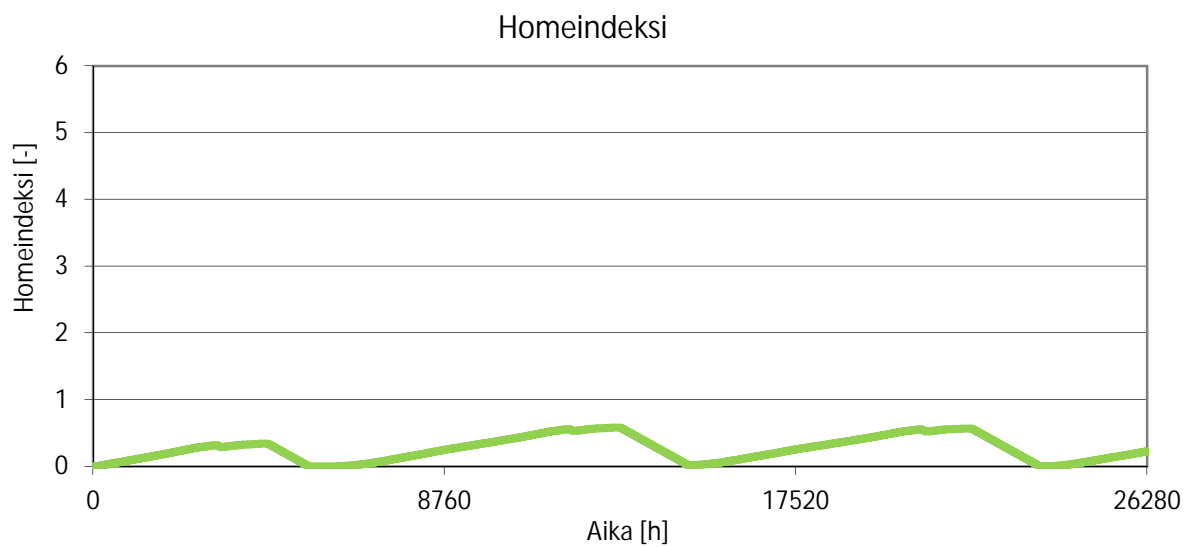
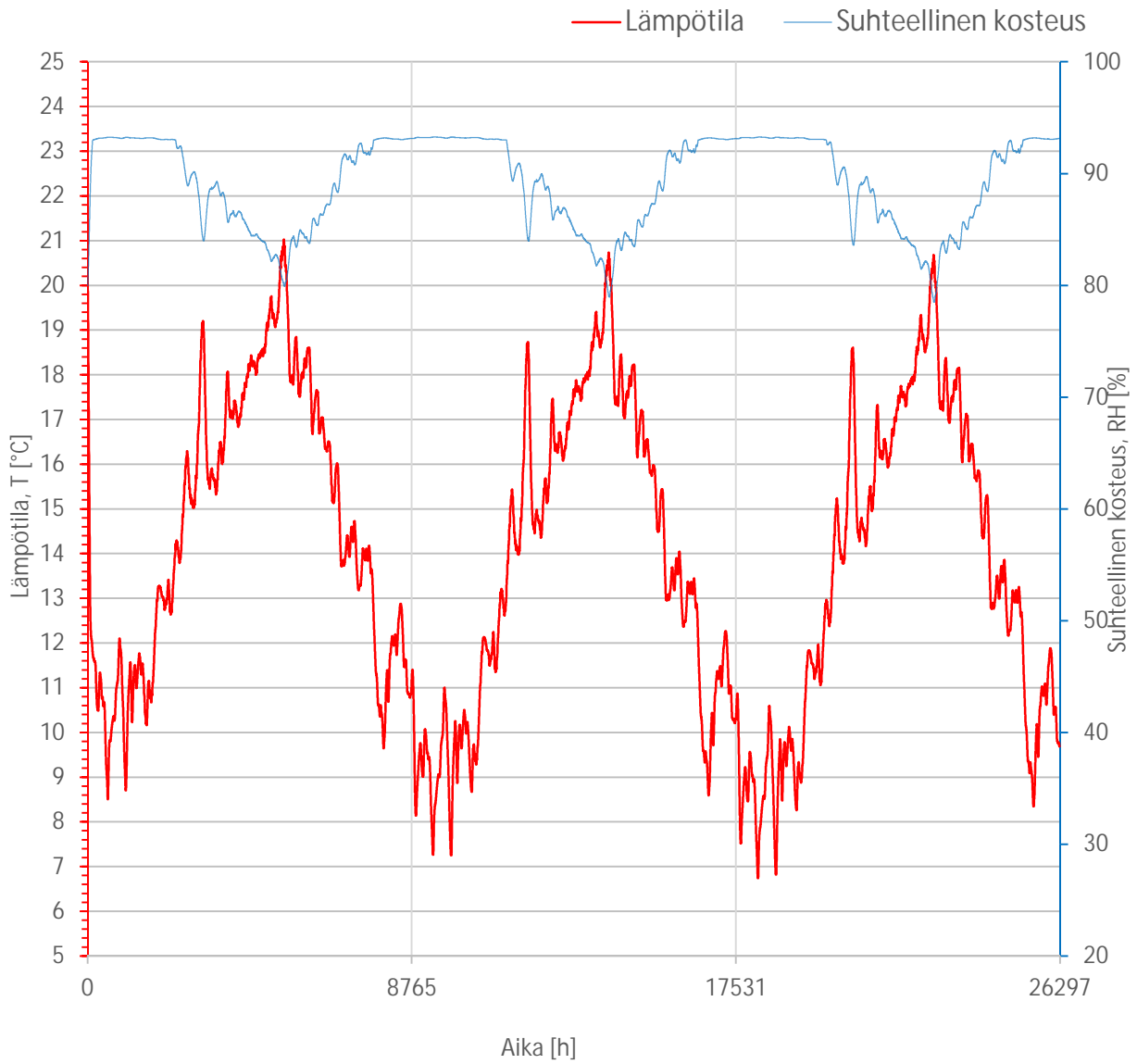
Tarkastelupiste	Tarkastelupiste- teen rakennus- materiaalit	Kasvunopeu- den herkkyys- luokka	Homeen maksi- mimäärän herk- kyysluokka	Taantuma- luokka [C _{mat}]	Homeindeksi [M _{max}]
TP-2 .01	bitumi	3	2	0,50	M = 0,581
	lastuvilla				
TP-2 .02	lastuvilla	3	2	0,50	M = 0
	tiili				
TP-2 .03	tiili	3	3	0,25	M = 0
	kapselointi				
TP-2 .04	bitumi	3	2	0,50	M = 2,498
	lastuvilla				
TP-2 .05	lastuvilla	3	2	0,50	M = 0
	tiili				
TP-2 .06	tiili	3	3	0,25	M = 0
	kapselointi				

Herkkyysluokitus	Kuvaus
hyvin herkkä	HHL 1 käsittelemätön, runsaasti ravinteita sisältävä puu
herkkä	HHL 2 höylätty puu, paperipintaiset tuotteet ja kalvot, puupohjaiset levyt
koht. kestävä	HHL 3 sementtipohjaiset materiaalit, muovipohjaiset materiaalit, mineraalivillat
kestävä	HHL 4 lasi- ja metallimateriaalit, tehokkaita suoja-aineita sisältävät tuotteet

Tarkastelupiste:

TP-2 .01

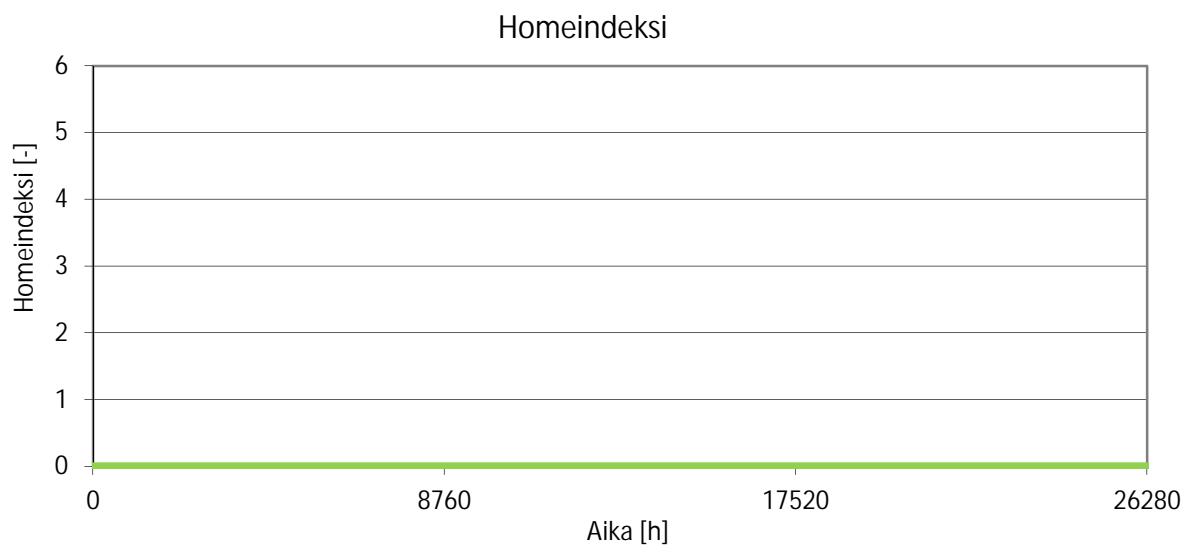
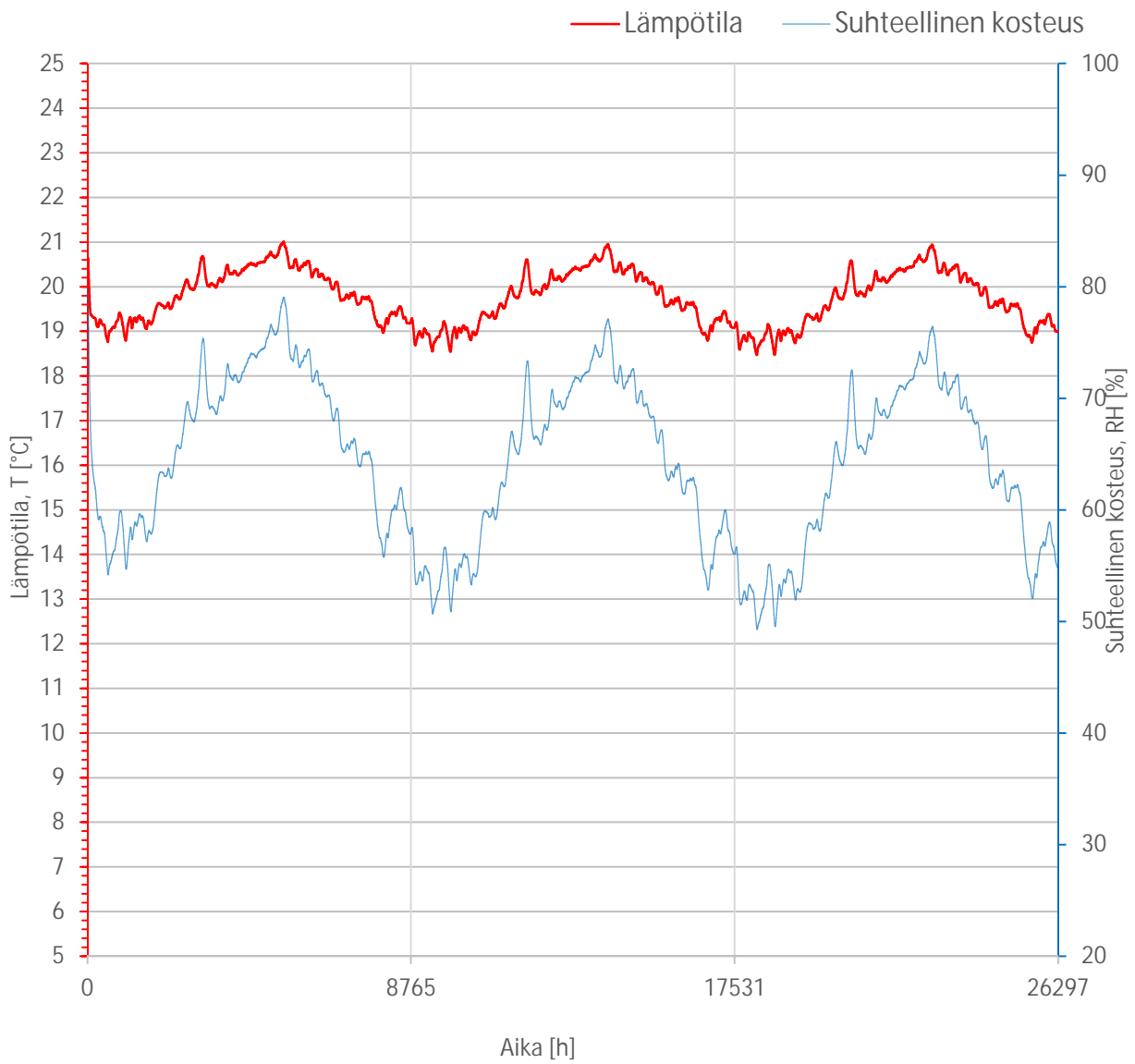
Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



Tarkastelupiste:

TP-2 .02

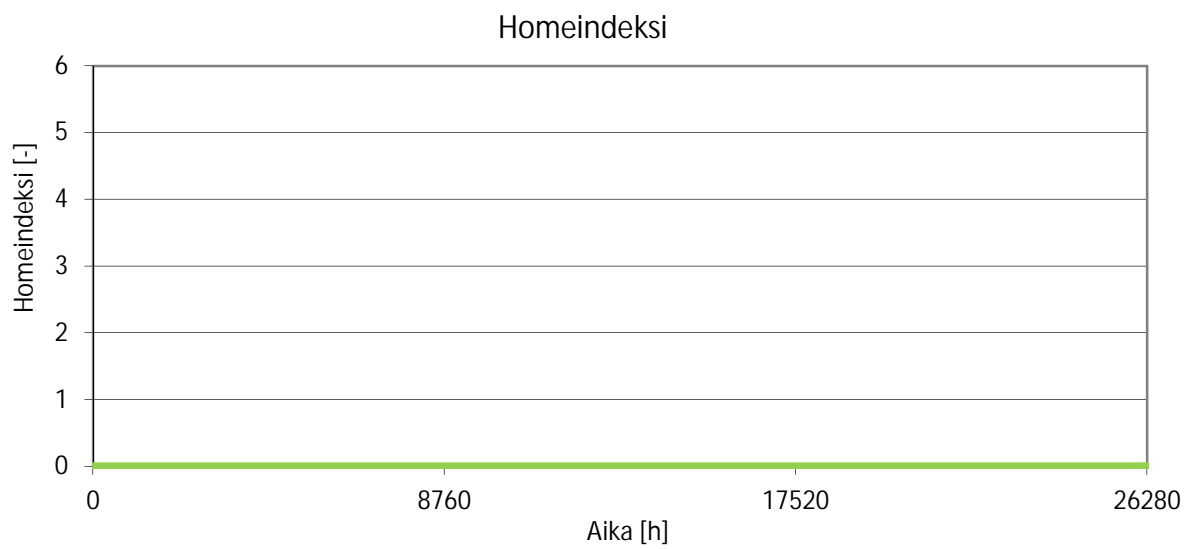
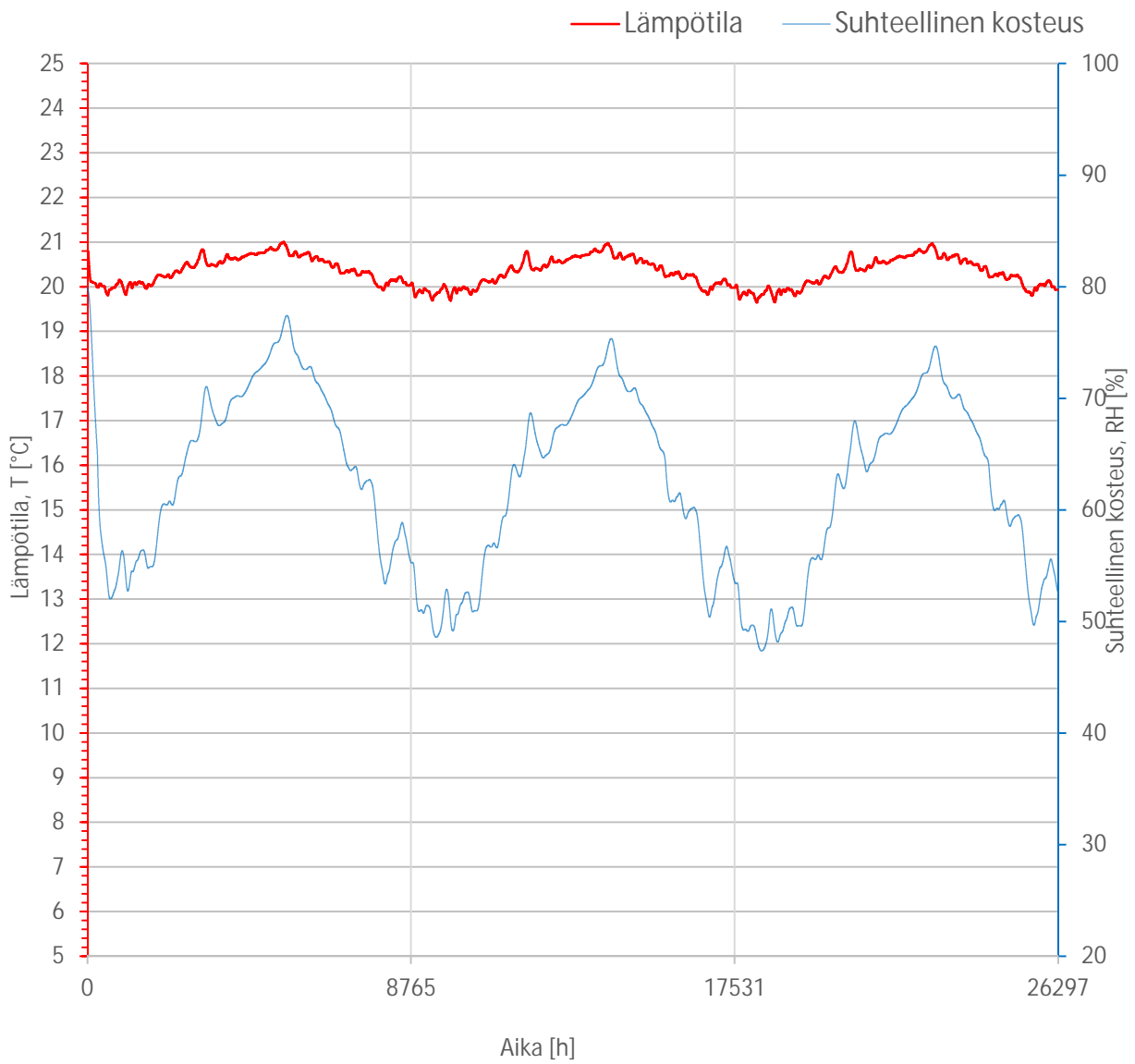
Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



Tarkastelupiste:

TP-2 .03

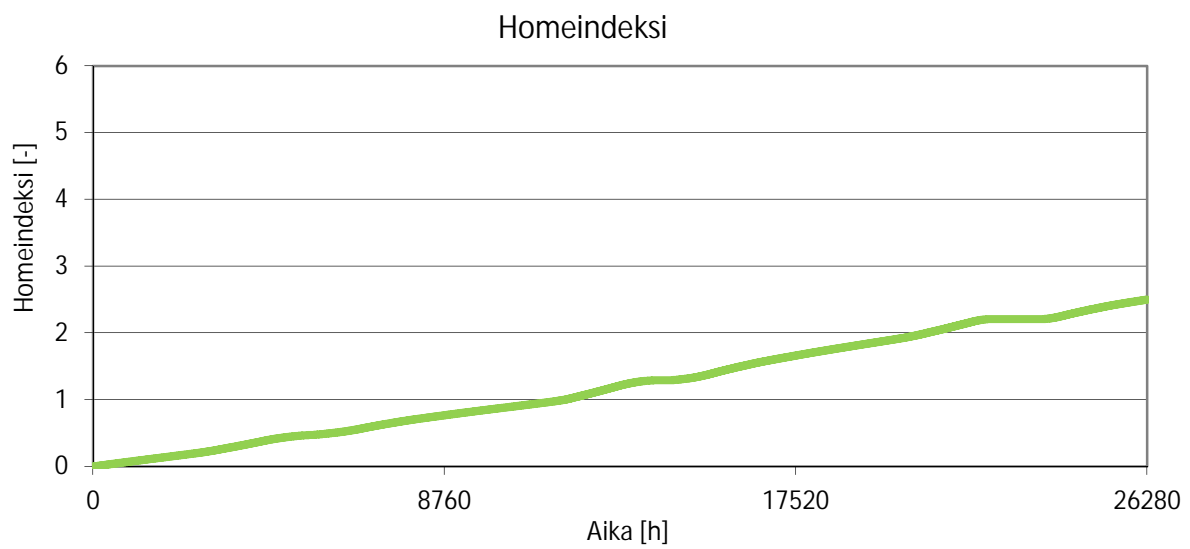
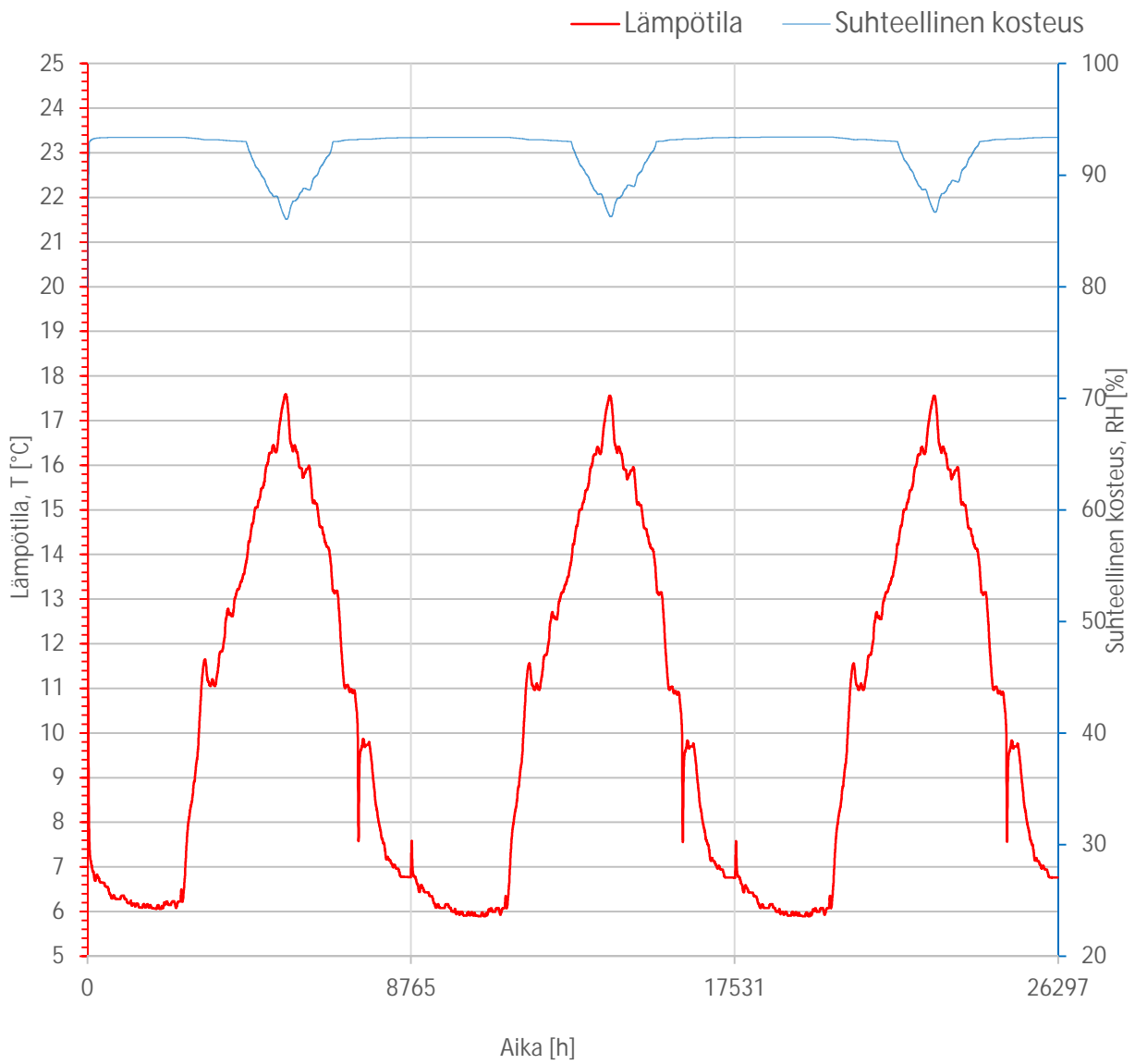
Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



Tarkastelupiste:

TP-2 .04

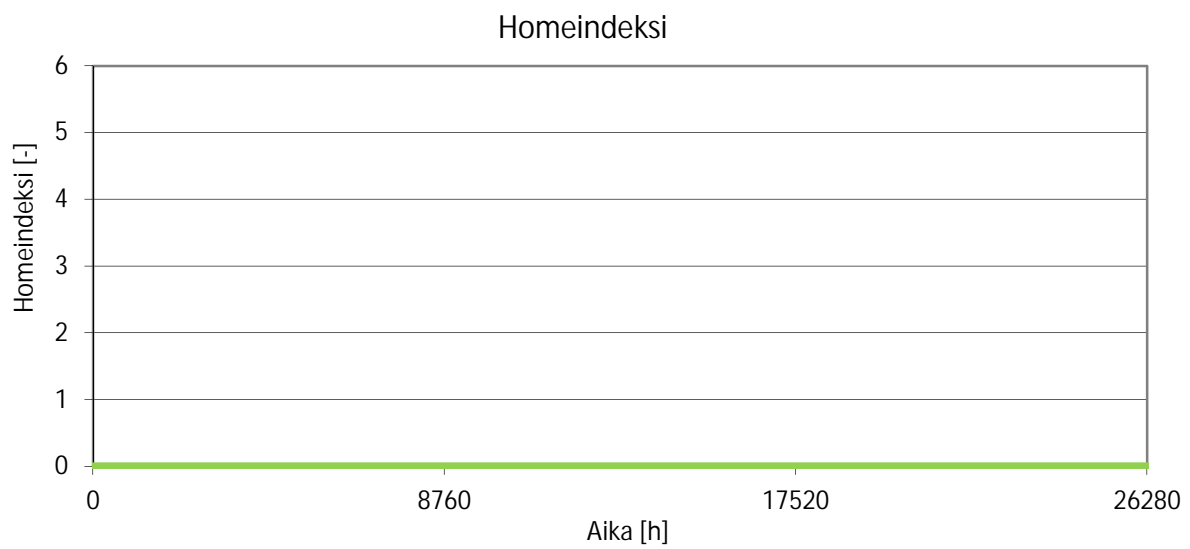
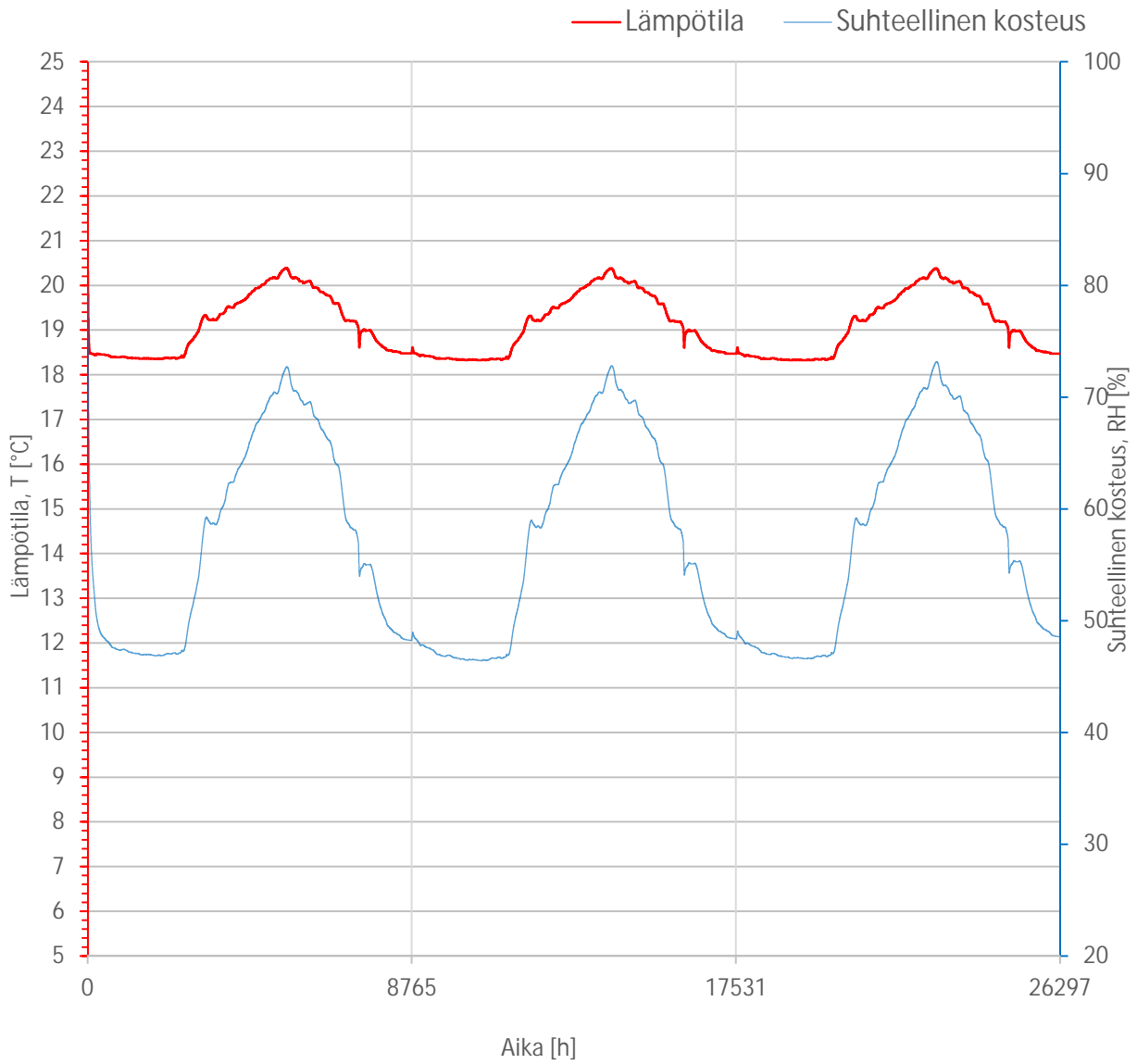
Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



Tarkastelupiste:

TP-2 .05

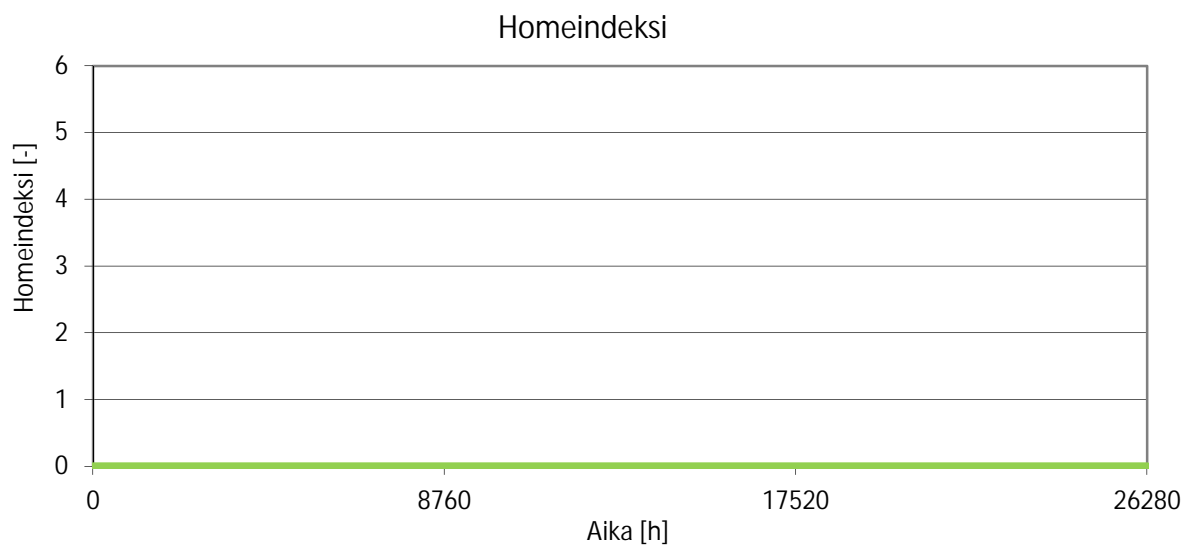
Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



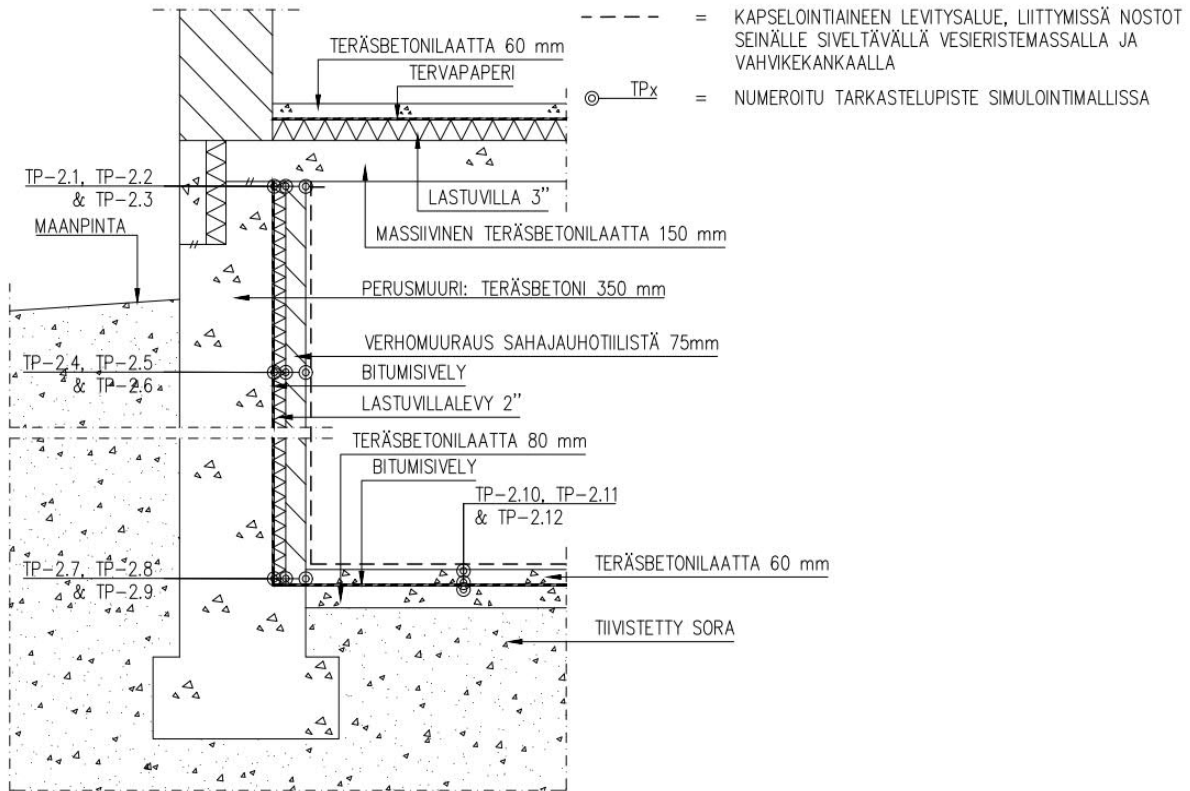
Tarkastelupiste:

TP-2 .06

Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



Kuvaus rakenteesta:



Homeindeksin tarkastelu WUFI Pro
 VTT ja TTY suomalainen homemalli

Rakennusfysikaalinen testivuosi
 Jokioinen 2004

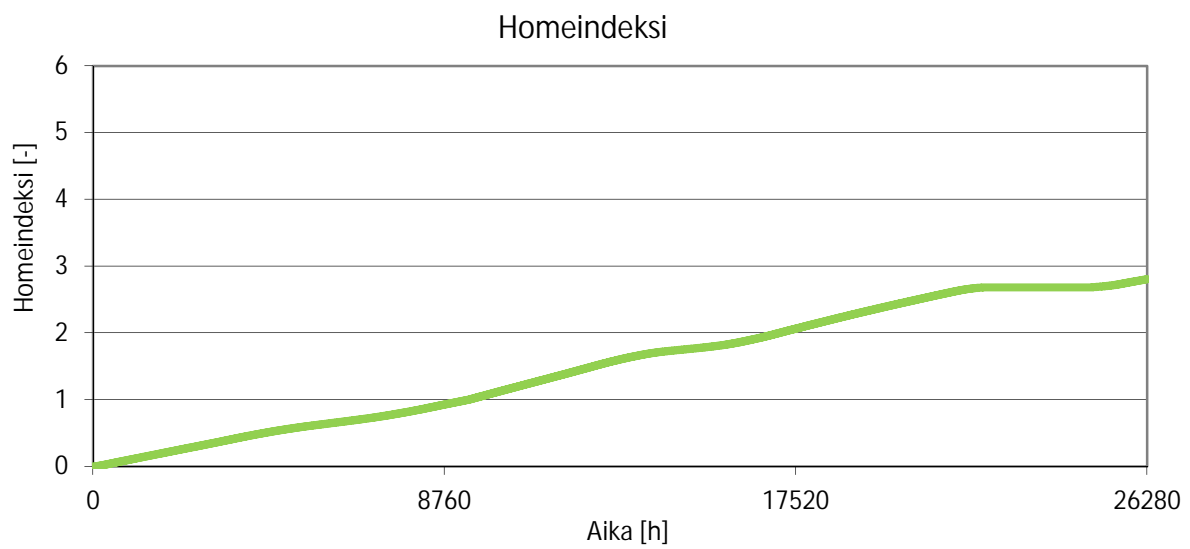
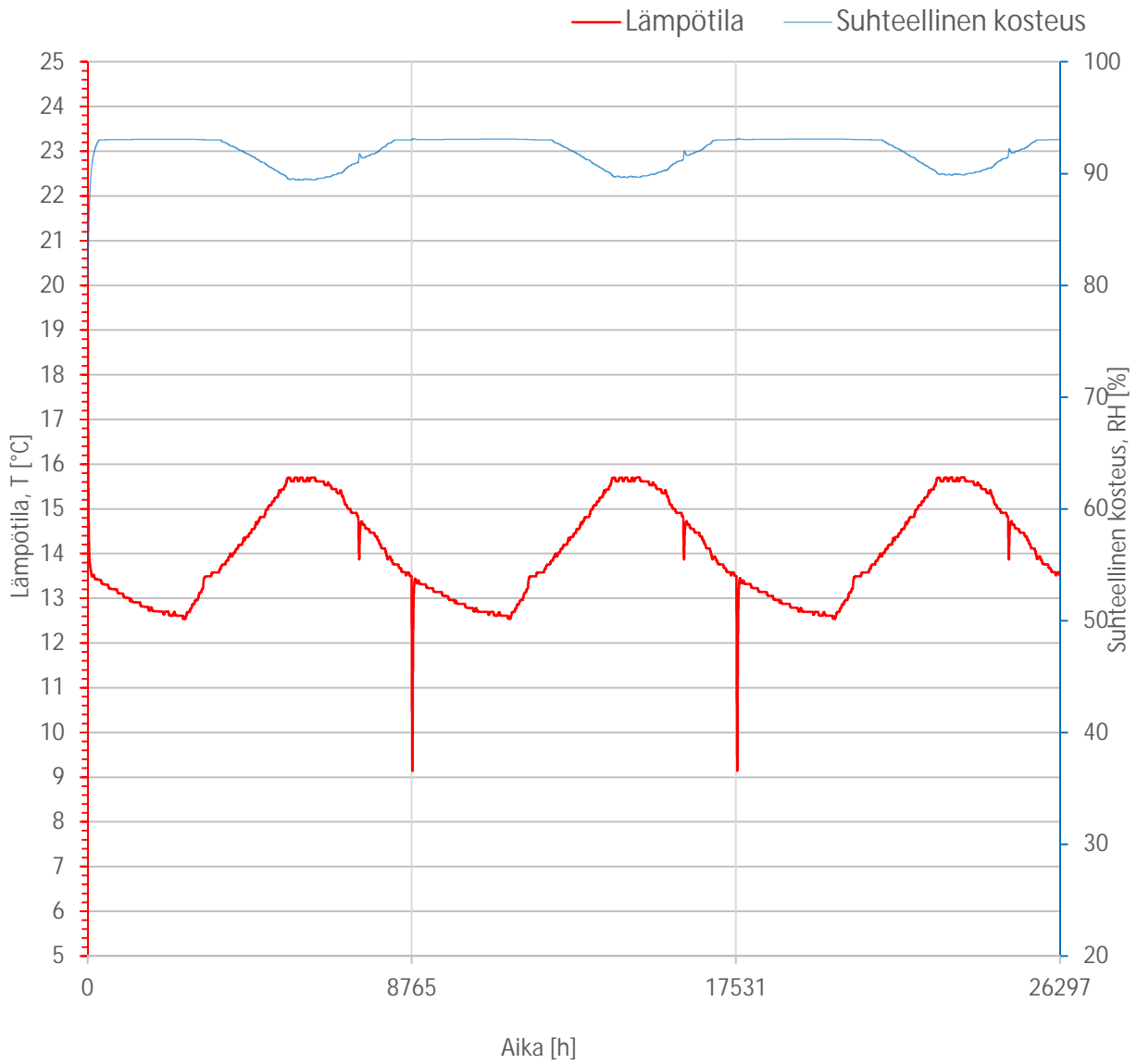
Tarkastelupiste	Tarkastelupiste- teen rakennus- materiaalit	Kasvunopeu- den herkkyys- luokka	Homeen maksi- määrän herk- kyysluokka	Taantuma- luokka [C _{mat}]	Homeindeksi [M _{max}]
TP-2 .07	bitumi	3	2	0,50	M = 2,804
	lastuvilla				
TP-2 .08	lastuvilla	3	2	0,50	M = 0
	tiili				
TP-2 .09	tiili	3	3	0,25	M = 0
	kapselointi				
TP-2 .10	betoni	3	3	0,25	M = 3,5
	bitumi				
TP-2 .11	bitumi	3	3	0,25	M = 0
	betoni				
TP-2 .12	betoni	3	3	0,25	M = 0
	kapselointi				

Herkkyysluokitus	Kuvaus
hyvin herkkä	HHL 1 käsittelemätön, runsaasti ravinteita sisältävä puu
herkkä	HHL 2 höylätty puu, paperipintaiset tuotteet ja kalvot, puupohjaiset levyt
koht. kestävä	HHL 3 sementtipohjaiset materiaalit, muovipohjaiset materiaalit, mineraalivillat
kestävä	HHL 4 lasi- ja metallimateriaalit, tehokkaita suoja-aineita sisältävät tuotteet

Tarkastelupiste:

TP-2 .07

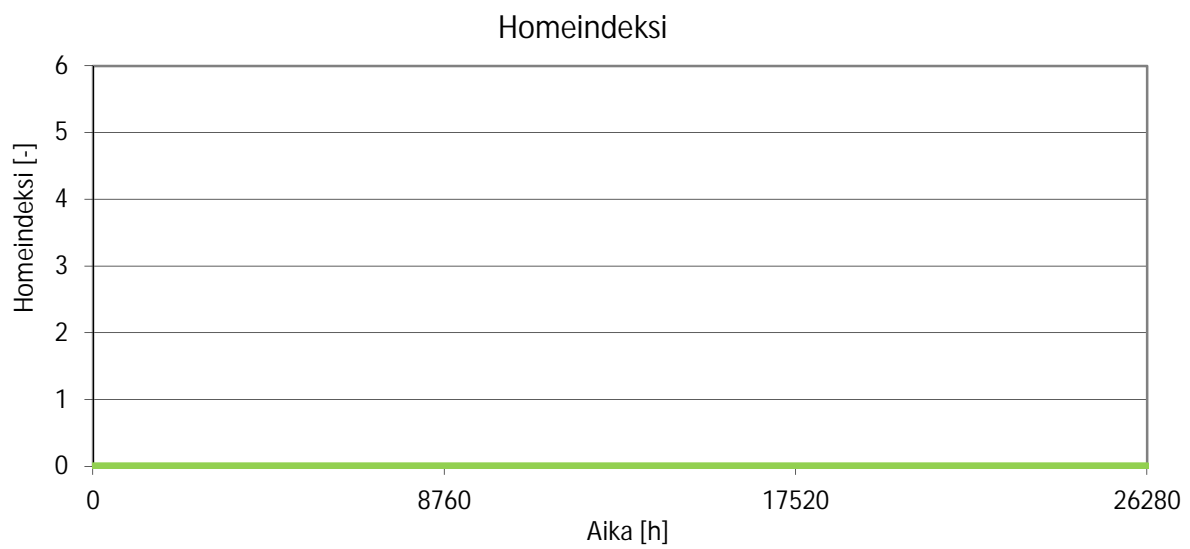
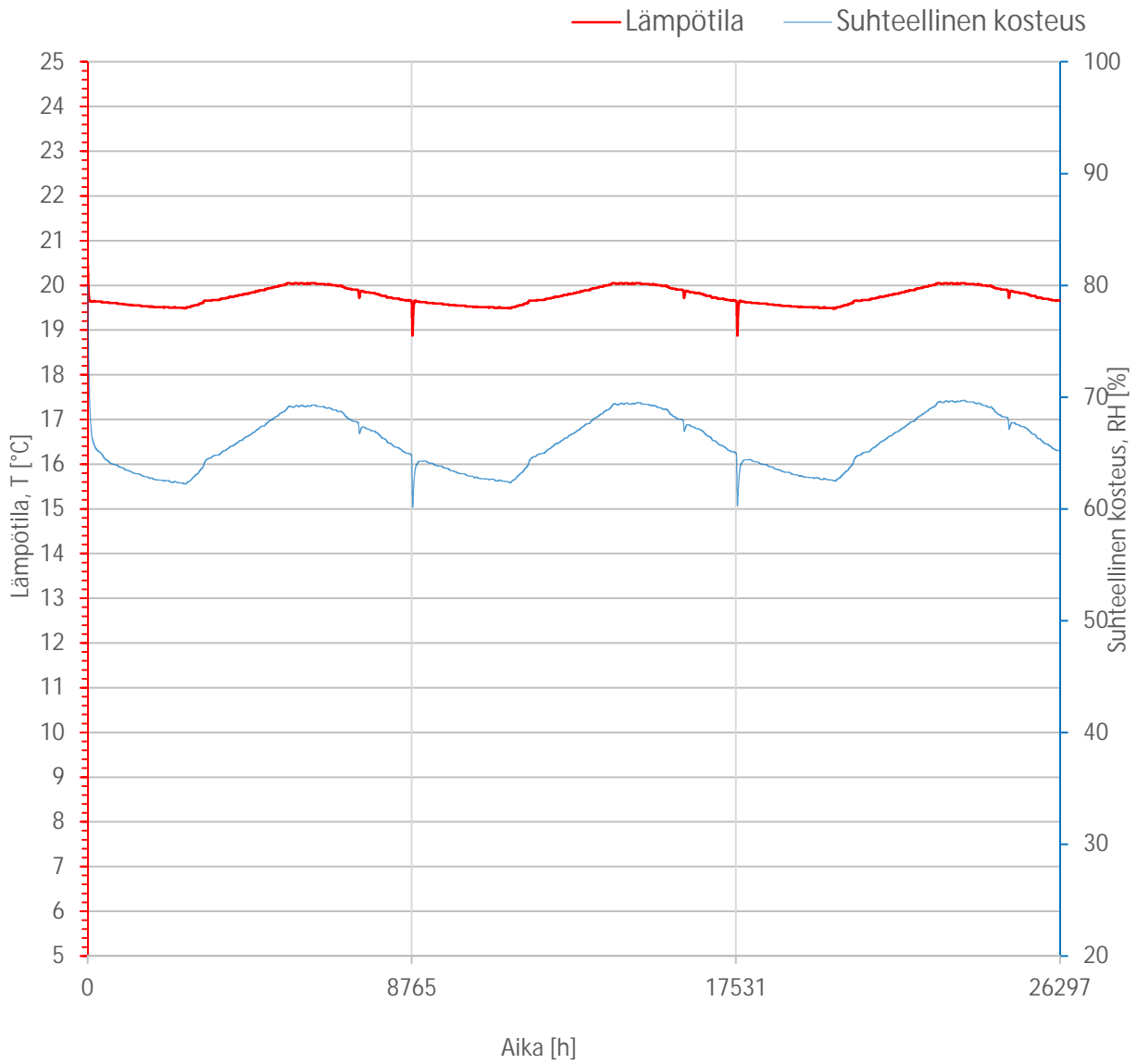
Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



Tarkastelupiste:

TP-2 .08

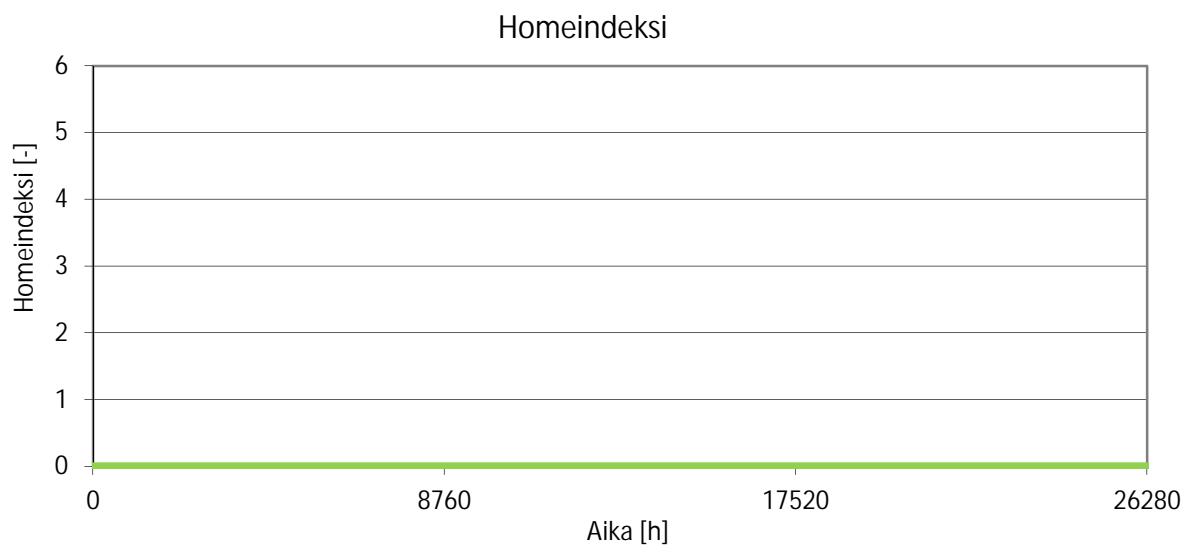
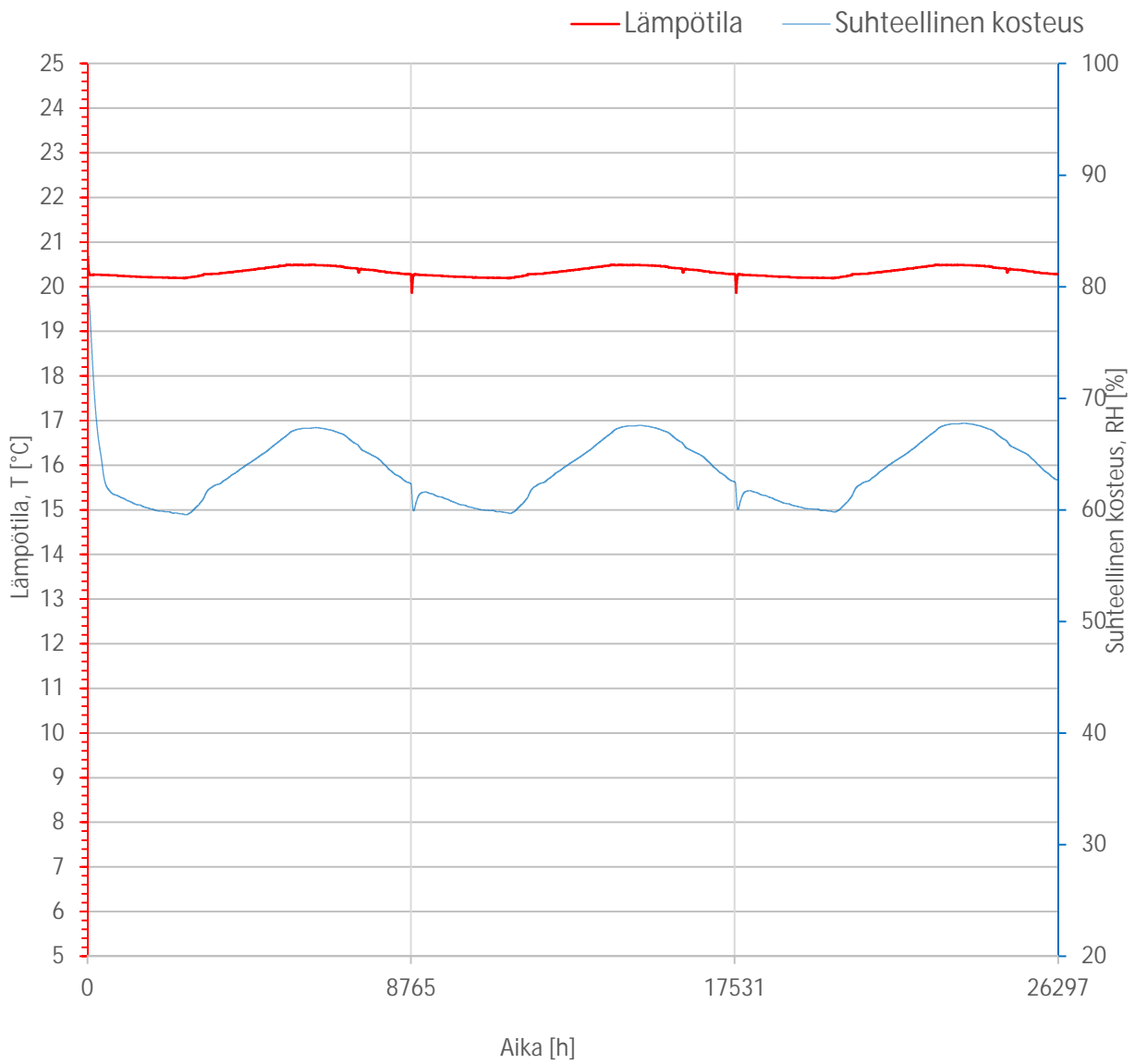
Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



Tarkastelupiste:

TP-2 .09

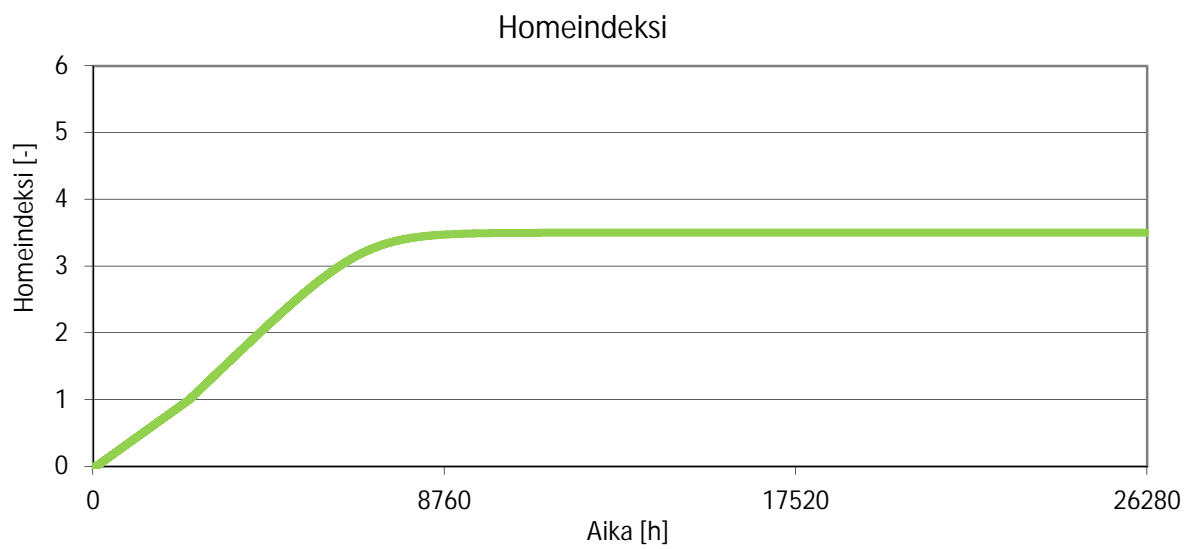
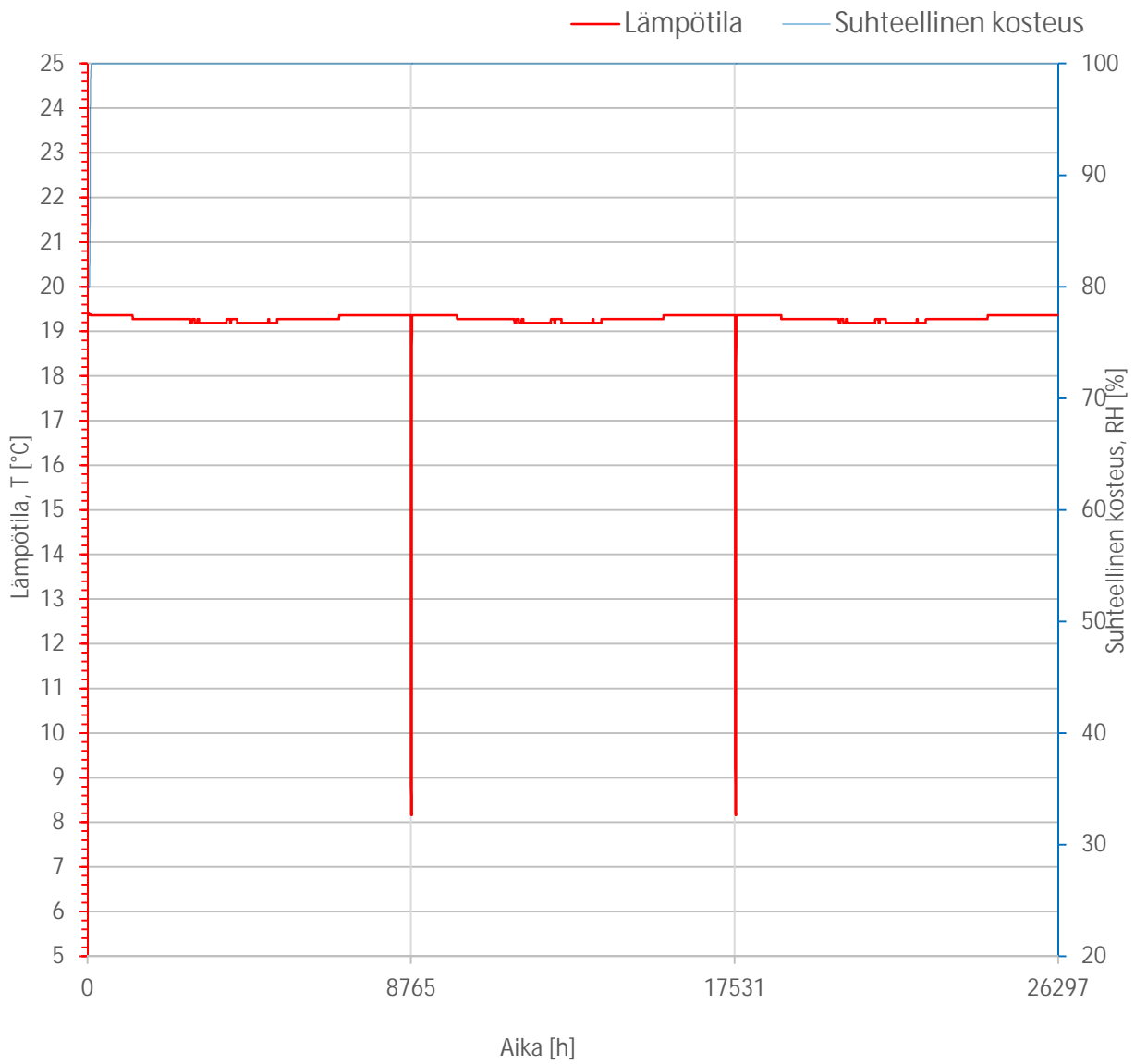
Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



Tarkastelupiste:

TP-2 .10

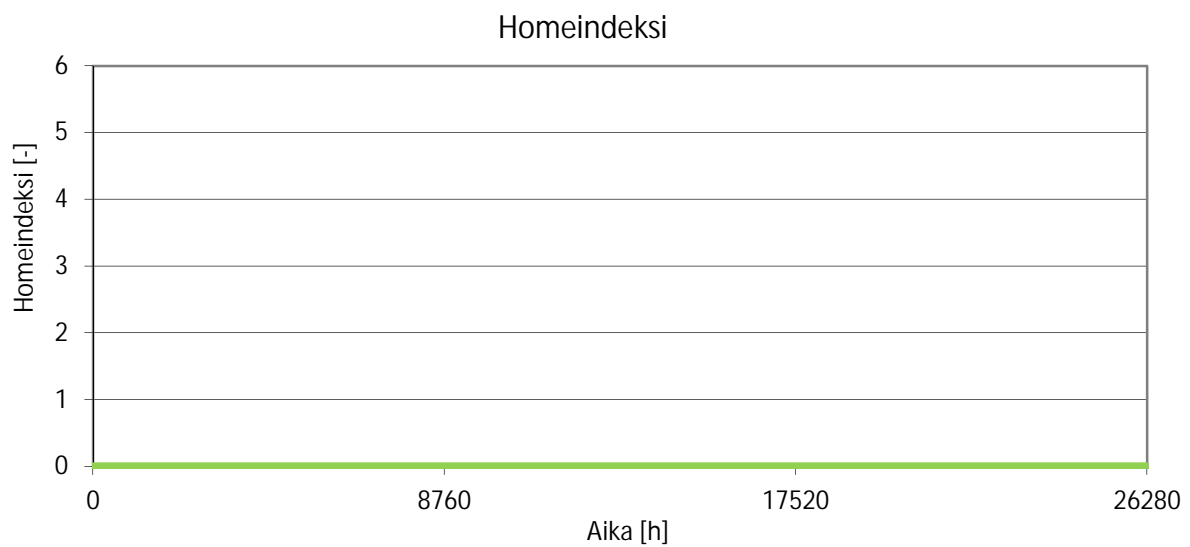
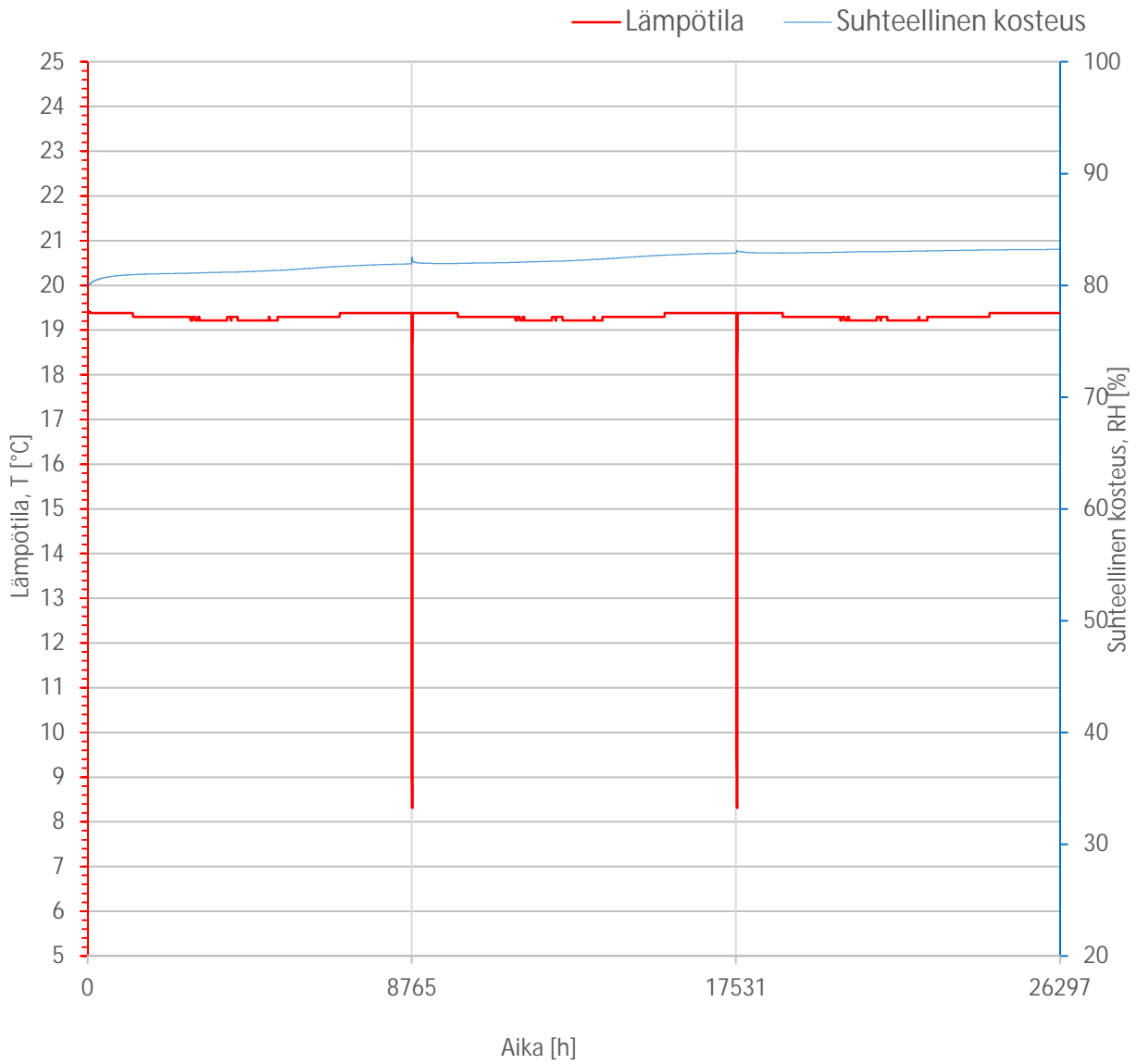
Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



Tarkastelupiste:

TP-2 .11

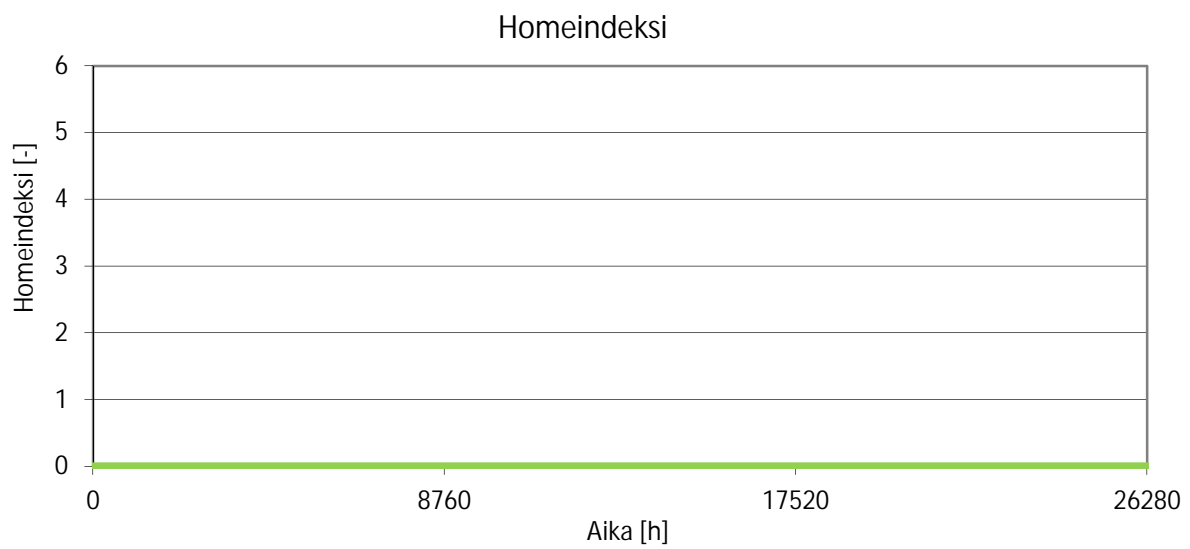
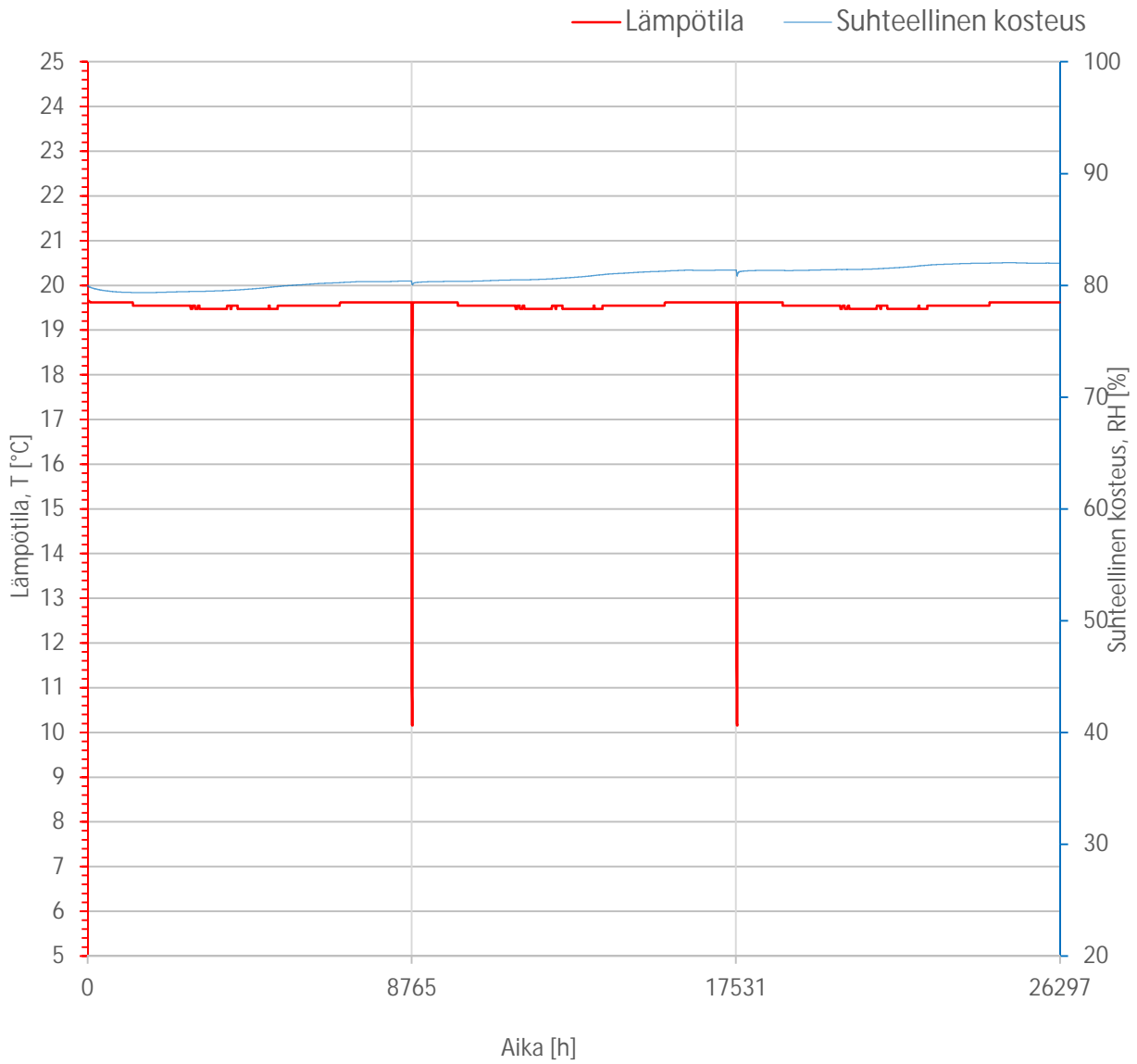
Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



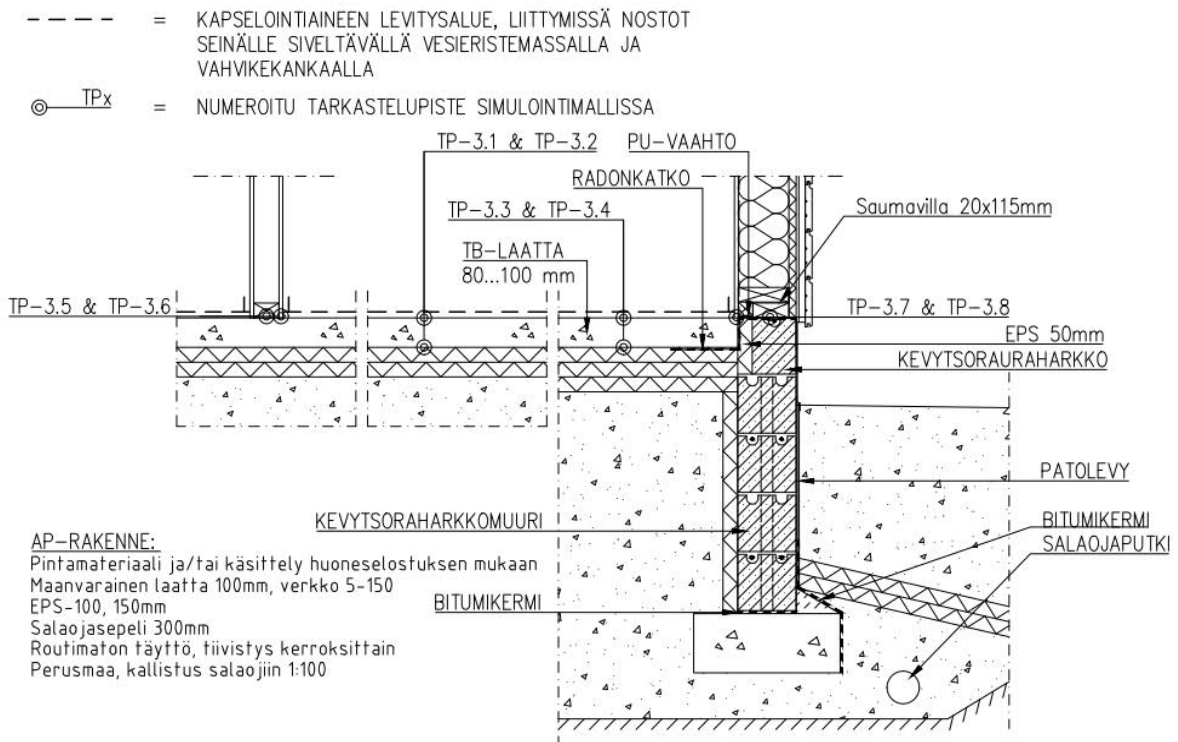
Tarkastelupiste:

TP-2 .12

Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



Kuvaus rakenteesta:



Homeindeksin tarkastelu WUFI Pro
VTT ja TTY suomalainen homemalli

Rakennusfysikaalinen testivuosi
Jokioinen 2004

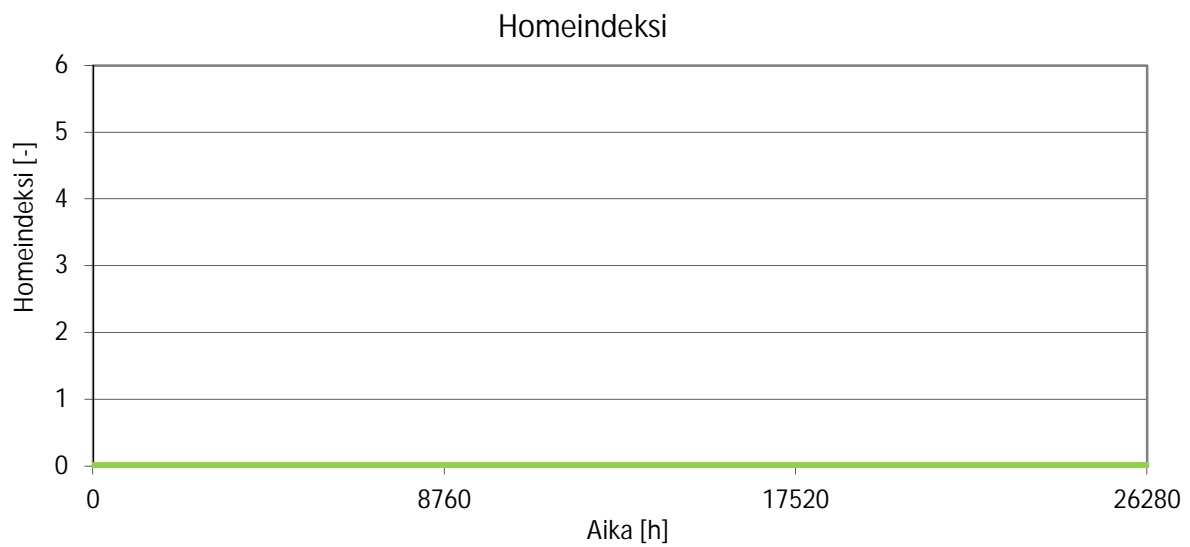
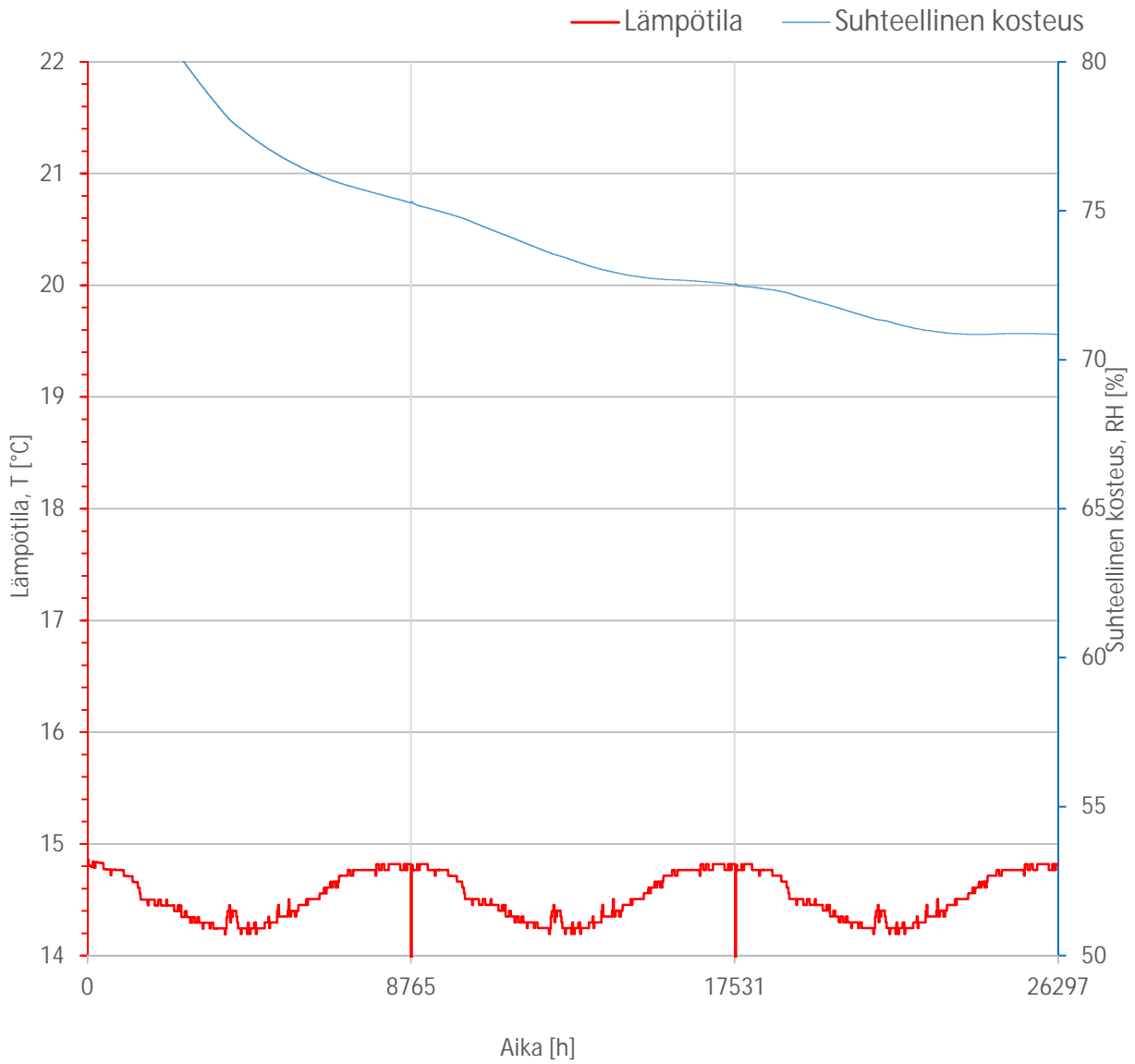
Tarkastelupiste	Tarkastelupiste- teen rakennus- materiaalit	Kasvunopeu- den herkkyys- luokka	Homeen maksi- määrän herk- kyysluokka	Taantuma- luokka [C _{mat}]	Homeindeksi [M _{max}]
TP-3 .01	betoni	3	3	0,25	M = 0
	EPS				
TP-3 .02	kapselointi	3	3	0,25	M = 0
	betoni				
TP-3 .03	betoni	3	3	0,25	M = 0
	EPS				
TP-3 .04	kapselointi	3	3	0,25	M = 0
	betoni				

Herkkyysluokitus	Kuvaus
hyvin herkkä	HHL 1 käsittelemätön, runsaasti ravinteita sisältävä puu
herkkä	HHL 2 höylätty puu, paperipintaiset tuotteet ja kalvot, puupohjaiset levyt
koht. kestävä	HHL 3 sementtipohjaiset materiaalit, muovipohjaiset materiaalit, mineraalivillat
kestävä	HHL 4 lasi- ja metallimateriaalit, tehokkaita suoja-aineita sisältävät tuotteet

Tarkastelupiste:

TP-3 .01

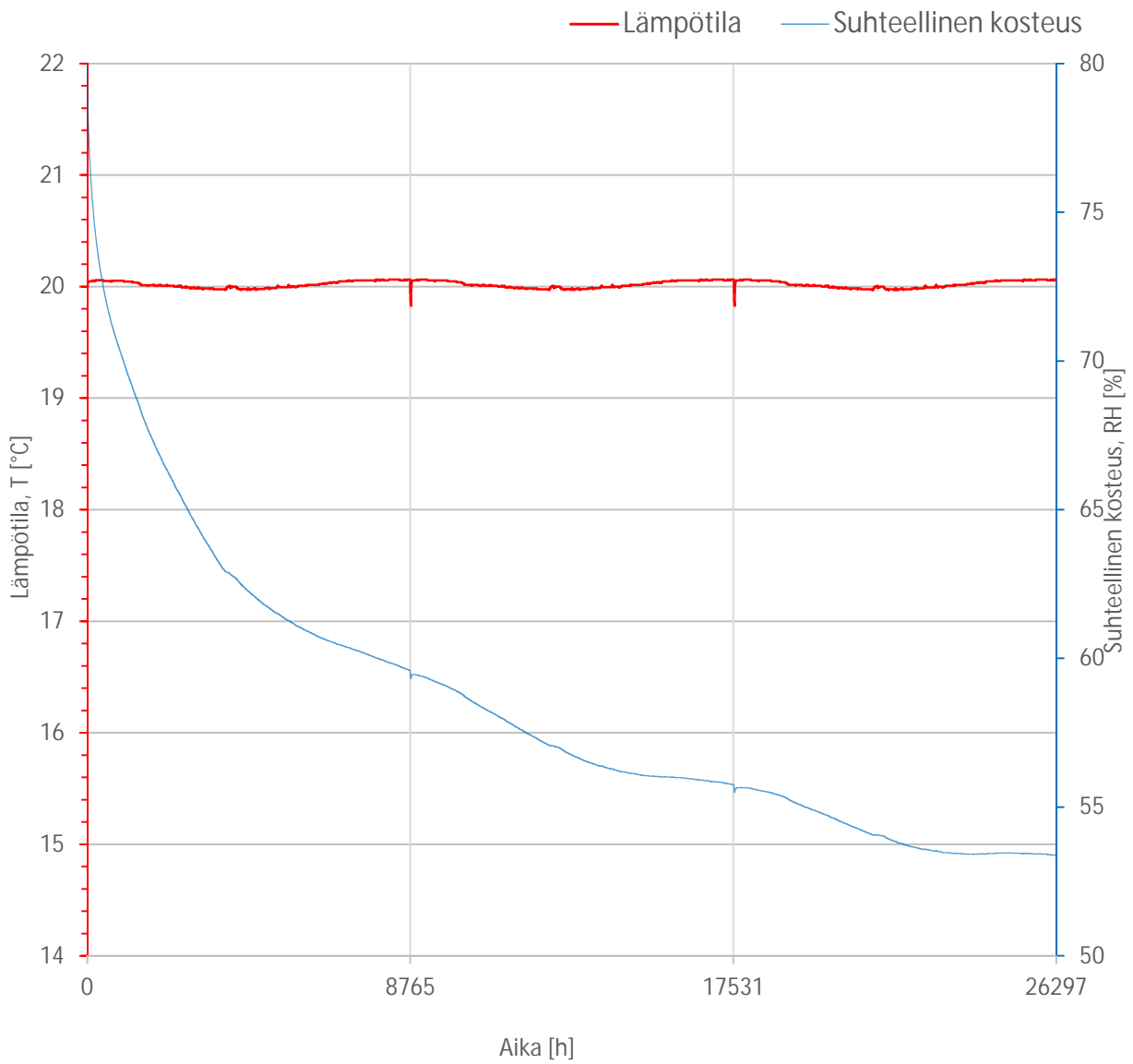
Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



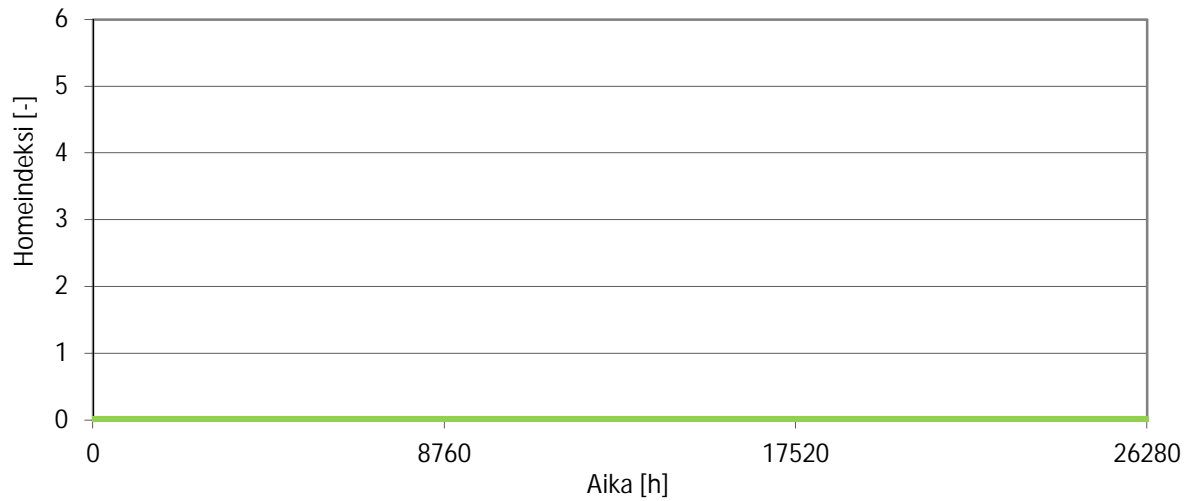
Tarkastelupiste:

TP-3 .02

Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



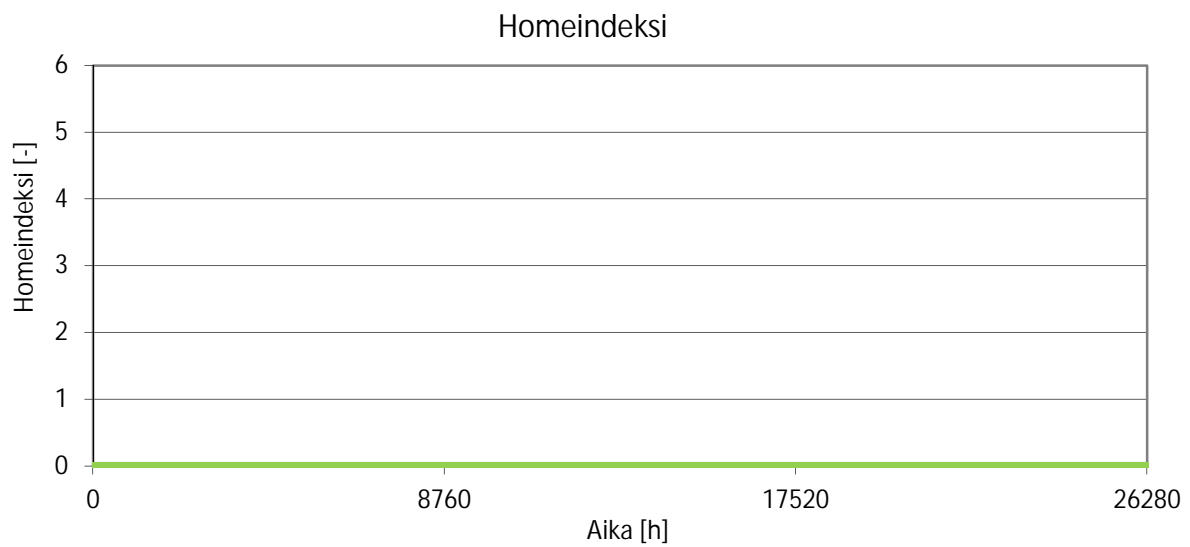
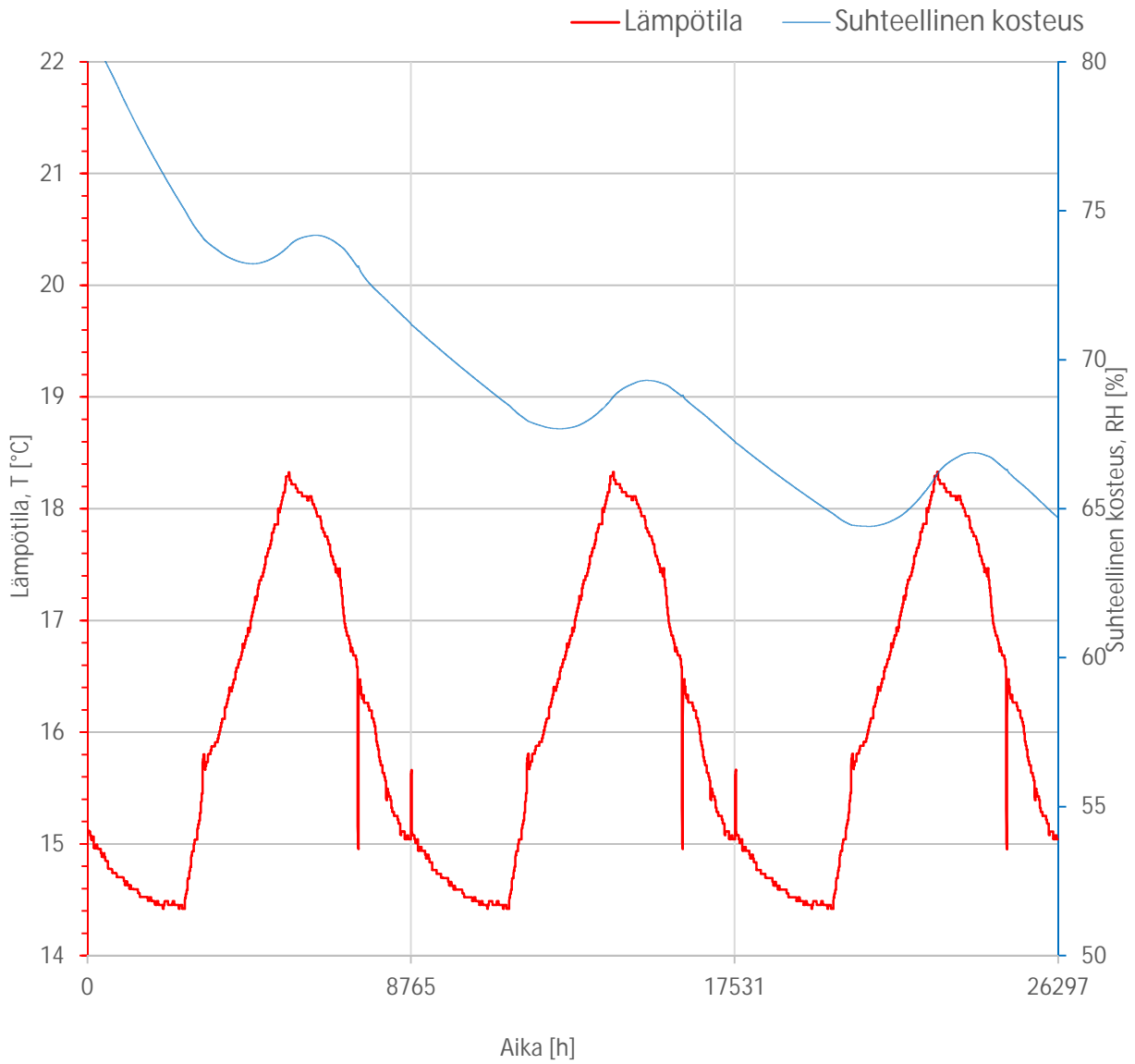
Homeindeksi



Tarkastelupiste:

TP-3 .03

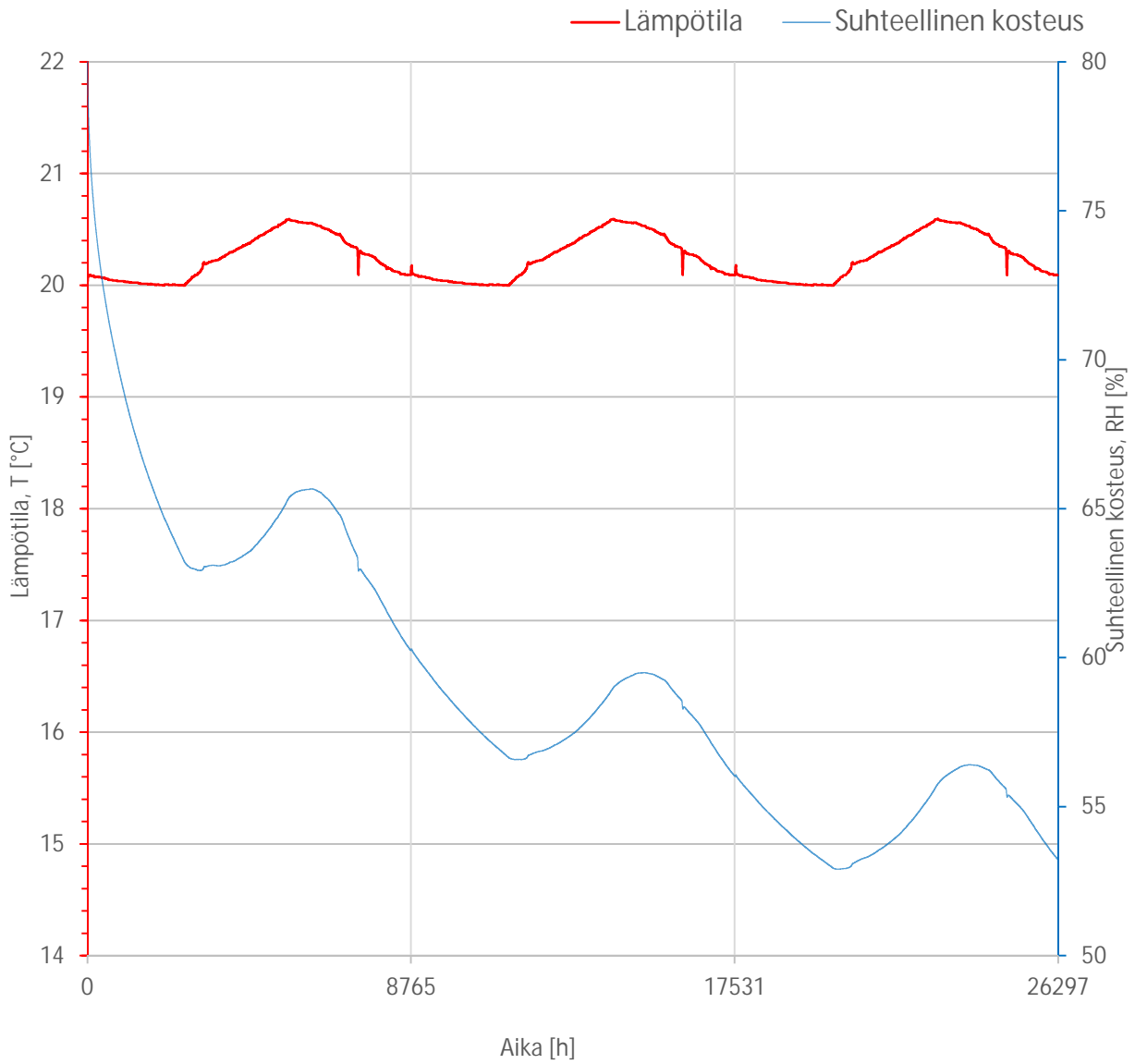
Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



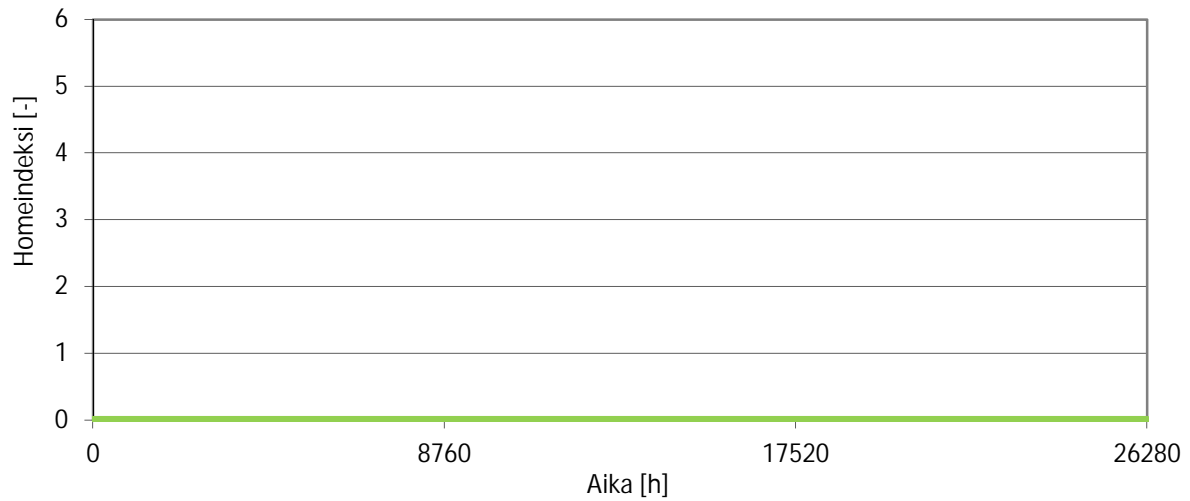
Tarkastelupiste:

TP-3 .04

Rakennusfysikaalinen testivuosi: Jokioinen 2004



Homeindeksi



Sisäilman suhteellinen kosteus (Jokioinen 2004):

Muutokset MathCad:n sisäisiin yksiköihin:

$$g \equiv \text{kg} \cdot 10^{-3}$$

$$i := 1..12 \text{ (kuukaudet)}$$

1. Ulkoilman lämpötila ja vesihöyrypitoisuus:

Ulkolämpötila kuukausikeskiarvoina (Jokioinen 2004):

$$\begin{array}{llll} t_{u_1} := -7.5 \text{ °C} & t_{u_2} := -4.9 \text{ °C} & t_{u_3} := -2.1 \text{ °C} & t_{u_4} := 4.7 \text{ °C} \\ t_{u_5} := 9.6 \text{ °C} & t_{u_6} := 12.1 \text{ °C} & t_{u_7} := 15.3 \text{ °C} & t_{u_8} := 15.7 \text{ °C} \\ t_{u_9} := 11.8 \text{ °C} & t_{u_{10}} := 4.9 \text{ °C} & t_{u_{11}} := -0.6 \text{ °C} & t_{u_{12}} := -0.9 \text{ °C} \end{array}$$

Ulkoilman suhteellinen kosteus kuukausikeskiarvoina (Jokioinen 2004):

$$\begin{array}{llll} RH_{u_1} := 92\% & RH_{u_2} := 90\% & RH_{u_3} := 86\% & RH_{u_4} := 60\% \\ RH_{u_5} := 63\% & RH_{u_6} := 67\% & RH_{u_7} := 78\% & RH_{u_8} := 79\% \\ RH_{u_9} := 89\% & RH_{u_{10}} := 90\% & RH_{u_{11}} := 94\% & RH_{u_{12}} := 98\% \end{array}$$

Ulkoilman kyllästysvesihöyrypitoisuus:

$$\nu_{\text{sat},u_i} := \left[4.85 + 3.47 \cdot \left(\frac{t_{u_i}}{10} \right) + 0.945 \cdot \left(\frac{t_{u_i}}{10} \right)^2 + 0.158 \cdot \left(\frac{t_{u_i}}{10} \right)^3 + 0.0281 \cdot \left(\frac{t_{u_i}}{10} \right)^4 \right] \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = \dots \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

Ulkoilman mitoitustilanteen
kosteuspitoisuus

$$\nu_{u_i} := RH_{u_i} \cdot \nu_{\text{sat},u_i} = \dots \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$\begin{array}{llll} \nu_{u_1} = 2.504 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3} & \nu_{u_2} = 3.024 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3} & \nu_{u_3} = 3.579 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3} & \nu_{u_4} = 4.024 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \\ \nu_{u_5} = 5.806 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3} & \nu_{u_6} = 7.218 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3} & \nu_{u_7} = 10.211 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3} & \nu_{u_8} = 10.593 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \\ \nu_{u_9} = 9.411 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3} & \nu_{u_{10}} = 6.118 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3} & \nu_{u_{11}} = 4.366 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3} & \nu_{u_{12}} = 4.454 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \end{array}$$

2. Sisäilman lämpötila ja vesihöyrypitoisuus:

Sisäilman lämpötila:

$$t_s := 21 \text{ °C}$$

Sisäilman kyllästysvesihöyrypitoisuus:

$$\nu_{\text{sat.s}} := \left[4.85 + 3.47 \cdot \left(\frac{t_s}{10} \right) + 0.945 \cdot \left(\frac{t_s}{10} \right)^2 + 0.158 \cdot \left(\frac{t_s}{10} \right)^3 + 0.0281 \cdot \left(\frac{t_s}{10} \right)^4 \right] \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = 18.314 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

Sisäilman kosteuslisä **kosteusluokan 2** mukaan, kuukauden keskilämpötilojen (Jokioinen 2004) perusteella:

Kosteuslisän arvo
kun lämpötila on
alle 5 °C.

$$\Delta_{\nu,5^\circ\text{C}} := 5 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

Kosteuslisän arvo
kun lämpötila on
yli 15 °C.

$$\Delta_{\nu,15^\circ\text{C}} := 2 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta_{\nu_1} := \begin{cases} \Delta_{\nu,5^\circ\text{C}} & \text{if } t_{u_1} \leq 5 \\ \Delta_{\nu,5^\circ\text{C}} - \left[\frac{\Delta_{\nu,5^\circ\text{C}} - \Delta_{\nu,15^\circ\text{C}}}{15 - 5} \cdot (15 - t_{u_1}) \right] & \text{if } 5 < t_{u_1} < 15 \\ \Delta_{\nu,15^\circ\text{C}} & \text{if } t_{u_1} \geq 15 \end{cases}$$

$$\Delta_{\nu_1} = 5 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta_{\nu_2} = 5 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta_{\nu_3} = 5 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta_{\nu_4} = 5 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta_{\nu_5} = 3.38 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta_{\nu_6} = 4.13 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta_{\nu_7} = 2 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta_{\nu_8} = 2 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta_{\nu_9} = 4.04 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta_{\nu_{10}} = 5 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta_{\nu_{11}} = 5 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta_{\nu_{12}} = 5 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

Sisäilman suhteellinen kosteus kosteuslisän kanssa kuukausikeskiarvoina:

$$\text{RH}_{s_1} := \frac{\nu_{u_1} + \Delta_{\nu_1}}{\nu_{\text{sat.s}}} = \dots\%$$

$$\text{RH}_{s_1} = 40.971\%$$

$$\text{RH}_{s_2} = 43.811\%$$

$$\text{RH}_{s_3} = 46.843\%$$

$$\text{RH}_{s_4} = 49.276\%$$

$$\text{RH}_{s_5} = 50.157\%$$

$$\text{RH}_{s_6} = 61.96\%$$

$$\text{RH}_{s_7} = 66.676\%$$

$$\text{RH}_{s_8} = 68.763\%$$

$$\text{RH}_{s_9} = 73.447\%$$

$$\text{RH}_{s_{10}} = 60.705\%$$

$$\text{RH}_{s_{11}} = 51.143\%$$

$$\text{RH}_{s_{12}} = 51.623\%$$