



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

PV-ELEMENTIDE JA FAASIMUUTUSMATERJALIGA KAETUD SOOJUSISOLATSIOONI LIITSÜSTEEMI SOOJUS- JA NIISKUSTEHNILINE TOIMIVUS

HYGROTHERMAL PERFORMANCE OF PCM AND PV COVERED ETICS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Martin Talvik
/nimi/

Üliõpilaskood 144425 EAEI

Juhendaja: Simo Ilomets, lektor
/nimi, amet/

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“16.” mai 2021

Autor: Martin Talvik
/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“17.” mai 2021

Juhendaja: Simo Ilomets
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” mai 2021.

Kaitsmiskomisjoni esimees	Jarek Kurnitski
	/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Martin Talvik (*autori nimi*) (sünnikuupäev: 09.06.1995)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „PV-elementide ja faasimuutusmaterjaliga kaetud soojusisolatsiooni liitsüsteemi soojus- ja niiskustehniline toimivus”,

mille juhendaja on Simo Ilomets,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

Martin talvik (*allkirjastatud digitaalselt*)

16.05.2021 (*kuupäev*)

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Martin Talvik, 144425
Õppekava, peeriala: EAEI02/09 - Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine
Juhendaja: Simo Ilomets, lektor, 55694494
Kaasjuhendaja: Paul Klõšeiko, ekspert
Konsultandid: Targo Kalamees, professor

Lõputöö teema:

(eesti keeles) PV-ELEMENTIDE JA FAASIMUUTUSMATERJALIGA KAETUD

SOOJUSISOLATSIOONI LIITSÜSTEEMI SOOJUSLIK JA NIISKUSTEHNILINE TOIMIVUS

(inglise keeles) THERMAL AND HYGROTHERMAL PERFORMANCE OF PCM AND PV-PANEL COVERED ETICS

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Defineerida soovituslik fassaadikrohvi deformatsiooniprofiilide samm, vältimaks ülemäärast pragude teket fassaadikrohvis;
2. Hinnata difusioonisoonte vajadus ning määrata nende geomeetria;
3. Hinnata päikesepaneelide (PV) elektritoodangu ja vastupidavuse muutust tänu faasimuutusmaterjali (PCM) jahutusefektile.
4. Võrrelda erinevate faasimuutusmaterjalide ja erinevate PCM kapseldamise lahenduste tõhusust ning valida välja neist sobivaim.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Soojuslike arvutuste teostamine, erinevatesse kliimadesse sobiliku faasimuutusmaterjali välja valimine, erinevate PCM-i ja PV paneeli kinnitusvariantide soojustehniline analüüs.	15.03.2021
2.	Maksimaalsete temperatuuri ja niiskuse kõikumispiiride välja selgitamine erinevates kliimades. Neist tekkivate maksimaalsete deformatsioonide võrdlemine krohvi purunemisdeformatsioonidega.	05.04.2021
3.	2D niiskustehniline arvutus difusioonikanalitega ja ilma. Arvutused erinevate difusioonikanali pikkustega. Erinevate PCM kapseldamise lahenduste niiskusliku toimivuse uurimine. Erinevate konstruktsiooni- ja soojustusmaterjalide mõju hindamine.	08.05.2021

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "17" mai 2021.a

Üliõpilane: Martin Talvik "16."mai 2021.a
/allkiri/

Juhendaja: Simo Ilomets "17."mai 2021.a
/allkiri/

Kaasjuhendaja: Paul Klõšeiko "17."mai 2021.a
/allkiri/

Konsultant: Targo Kalamees "17."mai 2021.a
/allkiri/

Programmijuht: Irene Lill "... "mai 2021.a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	8
ABSTRACT	9
Lühendite ja tähiste loetelu	10
1. SISSEJUHATUS.....	12
2. TÖÖ TEOREETILISED ALUSED JA VARASEMAD UURINGUD	
2.1 Euroopa hoonefond ja energiatõhususe nõuded. Nõudlus PV paneelide järgi	16
2.2 Päikeseenergia sektori kasv, PV paneelide pakkumine.....	17
2.3 Nõuded uuritavale tarindile	17
2.4 Soojus- ja niiskuslevi mehhanismid. Niiskuskooormused	18
2.5 SILS fassaadide tüüpilisemad kahjustused	21
2.6 Pragude teke fassaadis	22
2.7 Hoone energiatootmise maksimeerimine	24
2.8 Fassaadi ülekuumenemisest tingitud PV paneelide efektiivsuse langus	25
2.9 PV paneelide ülekuumenemisest tekkivad kahjustused	28
2.10 Võimalused PV paneelide jahutamiseks	30
2.11 Faasimuutusmaterjalide mõju PV paneelide temperatuuridele	30
2.12 PCM-i mikrokapseldamine	32
2.13 PCM-i makrokapseldamine	33
3. MEETOD	
3.1 Soojus- ja niiskuslevi arvutuse tarkvara ja ääritingimuste valik	36
3.2 Uuritav tarind ja materjalide ehitusfüüsikalised omadused	38
3.3 Kliima ääritingimuste valik.....	53
3.4 Arvutusmodelite ülesehitus.....	58
4. TULEMUSED	
4.1 Sobiliku faasimuutusmaterjali lahenduse valimine	69
4.2 PCM-i kapseldamise ja kinnitamise lahenduste soojuslik toimivus	71
4.3 Temperatuuri- ja niiskusdeformatsioonide ulatus erinevates kliimades.	72
4.4 Niiskustehniline toimivus. Traditsiooniline SILS sein.....	77
4.5 Roostevabast terasest PCM kapsliga aktiivelementide niiskuslik toimivus	84
4.6 Krohvi sisse kapseldatud PCM graanulitega lahenduse niiskuslik toimivus.	89
4.7 Difusioonikanalitega PCM krohvi niiskuslik toimivus	97
5. JÄRELDUSED JA EDASISTE UURINGUTE VAJADUS.....	100
KOKKUVÕTE	104
SUMMARY.....	107
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	110

LISAD

Lisa 1. Peamised <i>Delphini</i> kasutatavad võrrandid	116
Lisa 2. Uuritavate tarindite ristlõiked	118
Lisa 3. Materjalide omaduste tabel	123
Lisa 4. Valitud painduva PV paneeli elektrotehnilised andmed.	124
Lisa 5. Tüüpilised ristlõiked erinevate kinnituslahenduste soojusläbivuse arvutamiseks.	125
Lisa 6. Poltide katmise mõju seina ristlõike samatemperatuurijoontele.	126
Lisa 7. PV paneeli tagumise pinna temperatuurid ühe aasta vältel kolmes asukohas tõhusaima PCM lahenduse juures.....	127
Lisa 8. Faasimuutusmaterjalide mõju ööpäevase PV paneeli temperatuuri- amplituudi alanemisele.	128
Lisa 9. Tavalise SILS fassaadi pooriõhu suhtelised niiskused uuritavates kliimades väiksemast aastastest kaldvihma koormusest suuremani	129
Lisa 10. Erinevate konstruktsiooni- ja soojustusmaterjalide mõju SILS seina niiskusrežiimile viie arvutusaasta jooksul Väike-Maarjas	130
Lisa 11. Metallkesta kapseldatud PCM lahenduse puhul betooni ehitusniiskuse (0,11 m ³ /m ³) välja kuivamine 4 aasta vältel EPS soojustuse korral.	131
Lisa 12. Metallkesta kapseldatud PCM lahenduse puhul betooni ehitusniiskuse (0,11 m ³ /m ³) välja kuivamine 4 aasta vältel MINERAALVILLA korral.....	132
Lisa 13. Krohvi sisse kapseldatud PCM lahenduse puhul betooni ehitusniiskuse (0,11 m ³ /m ³) välja kuivamine 4 aasta vältel EPS soojustuse korral.	133

EESSÕNA

Euroopa on juhtimas maailma üleminekut süsinikuneutraalsele taastuenergiat põhinevale säästvale majandusmodelile. Seetõttu kehtestatakse hoonetele järjest karmimaid energiatõhususe nõudeid, mille tõttu on järjest enam levimas hoonetega integreeritud päikesepaneelid. Päikesepaneelide paigaldamine katustele on juba üsna laialt levinud lahendus, kuid suurt päikesele avatud pinda pakuvad ka hoone fassaadid.

PV paneelide integreerimine fassaadiga vajab aga esteetiliselt vastuvõetavaid ning ehitusfüüsikaliselt toimivaid lahendusi.

Käesolevas töös uuritakse päikesepaneelide integreerimist soojusisolatsiooni liitsüsteemiga, ilma täissuuruses tuulutusvaheta. Paneelide ülekuumenemise vältimiseks on nende taha paigaldatud faasimuutusmaterjal, mis sulades keskpäevaseid kõrgeid pinnatemperatuure puhverdab. Veeaurutiheda väliskihi tagant niiskuse välja juhtimiseks on uuritud nii difusioonikanalite toimivust kui ka ilma kanaliteta lahendust, kus niiskus kuivab välja aktiivelementide kõrvalt. Fassaadi taha pääseva vee koguse vältimiseks on uuritud pragude tekke mehhanisme ning arvutatud vajalik deformatsiooniprofiilide paigaldamise samm.

Uudse tarindilahenduse toimivust kontrolliti soojus- ja niiskustehnilise arvutustarkvara *Delphin 6* abil. Soojuslikku toimivust ja elektrotehnilist tõhusust kontrolliti Eesti, Poola ja Hispaania kliimas ning fassaadi niiskuslikku toimivust Eesti, Soome, Norra ja Saksamaa kliimas. Soojusarvutuse mudel ning krohvisüsteemi materjali omadused kalibreeriti eksperimentaalsete tulemuste alusel. Käesoleva töö tulemusena pakuti välja mitu arvutuslikult soojus- ja niiskustehniliselt toimivat seinalahendust, mida on võimalik tulevikus kliimakambri katsete abil täiendavalt uurida.

Töö valmis koostöös Poola ehitusmaterjalide tootja Sto sp-ga. Magistritöö on osa En-ActivETICS rahvusvahelisest projektist, mille eesmärgiks on jõuda elektrienergiat tootva soojusisolatsiooni liitsüsteemi katsetusteni päris hoone fassaadil 2022. aastal. Laiendatud eesmärgiks on muuta päikesest elektrienergiat tootvad hooned laialtlevinud lahenduseks nii Euroopa uusehitistel kui ka renoveeritavatel hoonetel. Lisaks Tallinna Tehnikaülikoolile on projekti osalised ka Łódź-i Tehnikaülikool ning Slovakkia Teaduste Akadeemia.

VÕTMESÕNAD

SILS, PV-Paneel, faasimuutusmaterjal, PCM, niiskustehniline analüüs, fassaadikrohv, päikesepaneelid, fassaadid

ABSTRACT

Europe is global leader in the process of building up carbon neutral global society for year 2050. To meet future needs, our buildings have to meet strict energy efficiency norms and should produce energy on site. One of the easiest ways to make a building to produce energy is to integrate PV panels. Nowadays, applying PV panels on building roofs is getting more common, but relatively large façade surfaces remain mostly untouched. In order to integrate PV panels to building facades, there is a strong demand for aesthetically acceptable, thermally and hygrothermally tested solutions.

In this paper, novel solution for integrating ETICS façade system with PV panels without cooling air flow at the back side of PV panels was researched. If there is no cooling air flow at the back side, another cooling method should be applied. One passive cooling method is using Phase Change Material (PCM), which would melt during the daytime, when there is excess solar radiation and will solidify at night.

To avoid precipitations getting behind the façade, crack resistance of plaster and PV panel façade was researched. Necessary distance between deformation profiles was calculated. In order for moisture to dry out behind the vapour-tight PV panel, both diffusion canals and drying out through façade plaster in areas between the active elements, were studied. As a result more than one solutions for constructing well performing walls from hygrothermal point of view were selected.

Coupled heat, air, moisture and matter transport software Delphin 6 was used to model the performance of the wall assemblies. Thermal performance and PV panel efficiency were modelled in climates of Estonia, Poland and Spain. Hygrothermal performance was checked in Estonia, Finland, Norway and Germany. Thermal calculation model was calibrated with real life experimental results.

As a result of this research, well performing novel active wall solution was proposed. Future experimental research consisting of small laboratory scale as well as building scale experiments should be conducted in the future.

The study was conducted in cooperation with Polish construction material producer Sto sp. Current master thesis was a part of international research project En-ActivETICS, which has a goal to develop and test energy producing ETICS system at a building scale in year 2022. Wider goal is to make building integrated PV panels more common in Europe for new and renovated buildings. Besides of TalTech, Łódź University of Technology and Slovak Academy of Science are a part of En-ActivETICS project.

Lühendite ja tähiste loetelu

Lühendid

ASHRAE – Ameerika kütte- ja ventilatsiooniinseneride liit (ingl k *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*)

a-Si:H PV – vesinikuga passiveeritud amorfsest silikoonist koosnevad painduvad PV elemendid (ingl k *hydrogenated amorphous silicon PV*)

BIPV – Hoonega integreeritud päikesepaneelid (ingl k *Building Integrated PV*)

BPIE – Euroopa hoonete energiatõhususe parandamise instituut (ingl k *Buildings Performance Institute Europe*)

CdTe –kaadmiumtelluriiti sisaldav PV painduv ja õhuks PV (ingl k *Cadmium telluride PV*)

c-Si PV – Kristalliseeritud silikoonist koosnevad PV elemendid (ingl k *crystalline silicon PV*)

EC – Euroopa komisjon (ingl k *European Commission*)

EN – Euroopa standard

EP – Euroopa parlament (ingl k *European Parliament*)

EPS – Paisutatud polüstüreeni graanulitest soojustusmaterjal (ingl k *Expanded Polystyrene*)

EVS – Eesti Vabariigi standard

FPV – Õhukesed ja painduvad päikesepaneelid (ingl k *Flexible Photo Voltaic*)

ISO – rahvusvaheline standard

OPV – orgaanilistest materjalidest toodetud PV (ingl k *Organic PV*)

PCM – Faasimuutusmaterjal (ingl k *Phase Change Material*)

PV - Fotogalvaaniline (ingl k *Photo-voltaic*)

PV-paneel – Päikesepaneel (ingl k *Photo-voltaic panel*)

SILS – Soojusisolatsiooni liitsüsteem (ingl k *External Thermal Insulation Composite System, ETICS*)

WDR - Kaldvihm (ingl k *Wind-Driven Rain*)

Tähised

A_w – kapillaarne veeimavus (ingl k Water absorption coefficient) $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$

c – materjali erisoojus ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$)

E – materjali elastsusmoodul (ingl k *elastic modulus*) (MPa)

K_{Leff} – Materjali vedelikujuhtivus efektiivse küllastusniiskuse juures (ingl k *liquid water conductivity at effective saturation*) ($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$) ehk taandatud ühikuga (s))

S_d – materjali suhteline difusioonitakistus (ingl k *equivalent vapour diffusion thickness*) (m)

T – materjali absoluutne temperatuur (K)

u – materjali siseenergia hulk ühes kuupmeetris (J/m^3)

A – pinna neelduvustegur (ingl k *Absorption Coefficient*) (-)

α – materjali temperatuuripaisumise koefitsient (ingl k *Linear Expansion Coefficient*) (-)

β – materjali niiskuspaisumise koefitsient (ingl k *Hygric Expansion Coefficient*) (-)

ε – materjali pinna emissiivsus (ingl k *emissivity*) (-)

$\varepsilon_{\max}$ – maksimaalne ekspluatatsioonis tekkiv deformatsioon (mm/m)

$\varepsilon_{\text{critical}}$ – kriitiline deformatsioon, mille korral materjal puruneb (mm/m)

λ – materjali soojuserijuhtivus (ingl k *thermal conductivity*) (W/m*K)

μ – materjali veeauru difusioonitakistustegur (ingl k *water vapour diffusion resistance factor*) (-)

ρ – materjali tihedus (kg/m³)

σ – mehaaniline pinge (ingl k *mechanical stress*) (MPa)

1. SISSEJUHATUS

Süsinikuneutraalsema tuleviku nimel on Euroopas hoonetele seatavad energiatõhususe nõuded järjest karmistumas. Nõuete täitmine vaid passiivsete meetoditega (piirdetarindite ja avatäidete soojusjuhtivuse vähendamine, arhitektuuri optimeerimine jne) on muutumas järjest keerulisemaks. Seetõttu on liginullenergia hoonete projekteerimisel vaja järjest enam mõelda ka krundil energia tootmise peale. Tuntakse järjest enam huvi selle vastu, kuidas hoone välispiirded elektrienergiat tootma panna.

Samal ajal on globaalne päikeseenergeetika sektor kiiresti kasvamas. 2030. aastaks prognoositakse 2019. aastaga võrreldes rohkem kui neljakordset globaalset päikesepaneelide võimsuse kasvu (International Energy Agency, 2019). Tohtu päikesepaneelide koguse paigaldamiseks on vaja aga ruumi.

Tänane praktika tähendab sageli päikesepaneelide paigaldust katusele, kuid paraku võib katusepinnast väheeks jääda. Vaba katusepinda on vaja kasutada energiatõhusate tehnosüsteemide (õhksoojuspumbad, ventilatsiooniseadmed ning -torud jne), katuseterrasside ja palju muu jaoks. Mida kõrgem on hoone, seda väiksemaks jääb vaba katusepinna ja kätava pinna suhe. Seetõttu, arvestades ka varjude vältimist, ei ole katustel sageli päikesepaneelide (ehk PV paneelide) tarbeks piisavalt ruumi. Ruumiprobleemi aitaks vähendada PV paneelide integreerimine lõunakaare (st idast lääneni) fassaadidele.

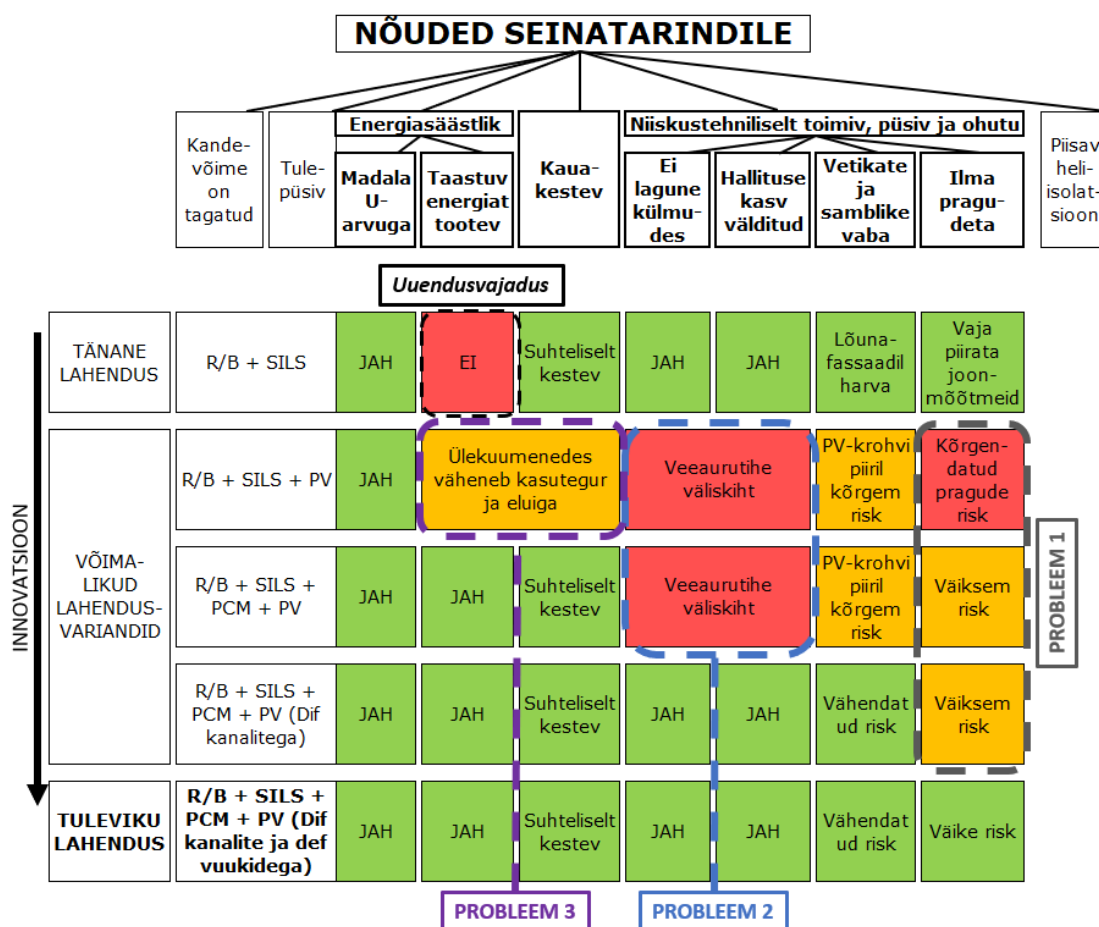
Traditsiooniliselt paigaldatakse PV paneele raamidele, mis tagavad õhu liikumise paneelide taga. Niiviisi välditakse paneelide ülekuumenemist ning ei muudeta hoone piirdekonstruktsioonide ehitusfüüsikalist toimivust. Kui katusel on selline lahendus üldiselt aktsepteeritav, siis fassaadide puhul kerkivad esile esteetilised probleemid. Integreerides päikesepaneelid krohvitud fassaadi tasapinda, saaksime esteetilisema tulemuse (Joonis 1).

Päikesepaneelide seinakonstruktsiooni sisse paigaldamisel on kolm suurt ehitusfüüsikalist probleemi (Joonis 2):

1. pragude teke tulenevalt krohvitud soojustuse ja PV paneelide erinevatest deformatsioonidest
2. PV elemendist tulenev veeaurutihe fassaadikate
3. fassaadi ülekuumenemisest tulenev PV elemendi elektritoodangu langus



Joonis 1. Arhitekti visualiseering Sõpruse pst 246 hoone näitel energiaactiveeritud krohvisüsteemiga renoveeritava hoone otsaseinast. Tumedad vertikaalsed päikesepaneelid moodustavad koos tumedate rõdu klaaspiiretega harmoonilise terviku. Paneelide vahele peaksid jääma tavalise krohvisüsteemiga alad, võimaldamaks efektiivsemat niiskuse välja kuivamist. (Kertsmik, 2021)



Joonis 2. Disainiprotsess traditsioonilisest SILS seinast energiat tootva SILS seinani. Käesoleva töö raames lahendatakse kolm põhiprobleemi ning eesmärgiks on saavutada kõiki nõudeid täitev tarindikontseptsioon.

Krohvitud fassaadi ja PV elemendi pinnakatte hele-tumeduse ja niiskuslimiku toimivuse erinevuse tõttu on nendel pindadel erinev temperatuur ja niiskussisaldus. See toob kaasa materjalide erinevad deformatsioonid. Erinevate ja liialt suurte deformatsioonide tõttu on oht soojustust katva krohvi pragunemiseks. Praod aga toovad endaga kaasa seina sisse valguva vee koguse suurenemise ja fassaadi lagunemise kiirenemise.

Teine probleem antud tarindi juures on see, et PV paneel on täielikult veeaurutihe. Kui tavalise soojusisolatsiooni liitsüsteemi (SILS) puhul on oluline jälgida õhekrohvisüsteemi veeauru läbilaskvust, et krohvi ja soojustuse vahel ei tekiks kondensaati, siis lisades tarindi välispinnale täielikult veeaurutiheda PV elemendi, võib teha eelduse, et selle taga difusiooni teel tarindit läbiv veeaur kondenseerub. Samuti ei võimalda veeaurutihe PV element ehitusniiskusel ja fassaadi liitekohtade või pragude kaudu seina sattunud kaldvihmal välja kuivada.

Kolmandaks kuumenevad PV paneelid päikesekiirguse mõjul suhteliselt kõrgete temperatuurideni, mis vähendab nende efektiivsust. Tänapäevased painduvad PV elemendid (*Flexible Photo Voltaic - FPV*) toodetakse ilma jäiga aluskonstruktsioonita ning neid on lihtne integreerida hoone fassaadiga. Kuid võrreldes traditsioonilise raamile paigaldatava paneeliga ei ole otse seinale paigaldatud paneelil võimalik tagakülge konvektsiooni teel jahutada. Seetõttu on keskpäevased PV elemendi pinnatemperatuurid kõrgemad ning see toob kaasa tootlikkuse languse ja PV moodulite eluea lühenemise. Samuti siseruumide jahutusvajaduse tõusu suvel (Toledo et al., 2020).

Seda probleemi on võimalik lahendada faasimuutusmaterjalidega (*Phase Change Material* ehk *PCM*). PCM omab kindlat, piirdetarindis kasutamiseks sobivat sulamistemperatuuri vahemikku ja suhteliselt suurt sulamissoojust. Võime seda ette kujutada kui väga suure termilise massiivsusega materjali, mis puhverdab hästi soojust ning püsib seejuures ise konstantsel temperatuuril. Just nagu jää sulab veeks konstantse 0 kraadi juures, neelates selle protsessi käigus suures koguses energiat. Piisava koguse materjali puhul on võimalik saavutada olukord, kus palaval suvepäeval neelab PCM suure osa PV paneelis neelduvast üleliigsest soojusest ning muudab enda oleku tahkest vedelaks. Kui seejärel öösel temperatuur langeb, siis annab PCM oma soojuse läbi päikesepaneeli väliskeskkonnale ära ning muutub uuesti tahkeks. Õigesti dimensioneeritud PCM-i koguse ja sulamistemperatuuri korral kordub see tsükkel kogu hoone kasutusea jooksul ning päikesepaneeli kasutegur püsib kõrge. Samuti väheneb öisel ajal soojuskadu sisekeskkonnast läbi välisseina.

Teoreetiliselt oleks võimalik kõik kolm probleemi lahendada kombineerides ühte seinatarindisse õhukese PV paneeli ja faasimuutusmaterjali, mille taga on traditsiooniline

SILS, lisades faasimuutusmaterjali taha välisõhuga ühendatud veeauru difusiooni kanalid või välisõhuga tuulutatavad konvektsiooni kanalid. Samas, võimaldades niiskusel kas kapillaarselt või difusiooni teel seina sees nõ külgsuunas liikuda, võib selguda, et piisavalt väikeste PV paneeli mõõtmete korral ei ole täiendavat niiskuse välja juhtimise viisi vaja. Antud lahenduste toimivust ei ole varasemalt uuritud ei niiskustehniliste arvutusmodelite ega katsetega. Seega tuleb aktiivelementide üldine kontseptsioon ja difusioonikanalite tüüp, mõõt, jne erinevate niiskuskoormuste tingimustes välja töötada.

Töö eesmärkideks on:

- 1) töötada välja sobiv arvutusmetoodika SILS + PCM + PV-paneel seinatarindi soojuslikuks ja niiskuslikuks analüüsiks;
- 2) anda hinnang SILS tarindi niiskustehnilise toimivuse kohta erinevate tingimuste korral Kesk-Euroopa ja Põhjamaade kliimas;
- 3) hinnata faasimuutusmaterjali mõju PV paneelide elektritoodangule erinevates Euroopa kliimades;
- 4) töötada välja meetod pragude tekke hindamiseks ning anda esialgne hinnang antud tarindi tervikliku toimivuse kohta;
- 5) pakkuda välja tarindilahendus kliimakambri katsete läbiviimise jaoks.

Töö kirjutamise ajal oli maailmas mitmeid lahendusi, kuidas päikesepaneelid hoone piiretesse integreerida (Huang et al., 2006) (Jun Huang, 2011). Kuid reeglina on nende puhul PV paneelid seinast tuulutusvahega eraldatud. Töös käsitletava seinakontseptsiooni eesmärk on loobuda läbivast tuulutusvahest ning integreerida PV paneelid SILS seinaga. Varasemad uuringud (Heim & Wieprzkowicz, 2016) (Hasan et al., 2015) on välja selgitanud, et selle teeb võimalikuks faasimuutusmaterjali lisamine PV paneelide taha, vältimaks nende ülekuumenemist. Kuid sellise veeaurutiheda väliskihiga tarindi niiskustehnilist toimivust põhjamaade kliimas ei ole varasemalt ei arvutuslikult ega ka katseliselt tõestatud.

2. TÖÖ TEOREETILISED ALUSED JA VARASEMAD UURINGUD

2.1 Euroopa hoonefond ja energiatõhususe nõuded.

Nõudlus PV paneelide järele

Euroopa Liidus, Šveitsis ja Norras on kokku 200 miljonit elamut ja 25 miljardit ruutmeetrit netopindala (BPIE, 2011). Nendest enamik on tänaseks üle 50 aasta vanad, mis tähendab et nende projekteeritud kasutusiga on ületatud. Ka Eestis on enamik korterelamuid ehitatud 1960., 1970. ja 1980. aastatel, mistõttu on nende elamute renoveerimine ka Eestis vajalik selleks, et täita ehitistele esitatavaid nõudeid (Ilomets, 2017). Arvestades mõistlikuks renoveerimise hinnaks 200 €/m² ning seda, et Eestis on korterelamute suletud netopinda üle 34 miljoni m², on renoveerimistööde mõju Eesti majandusele märkimisväärne (Kurnitski et al., 2014). Kusjuures renoveerimisse investeeritud raha on võimalik energiasäästu näol tulevikus kokku hoida. Lisaks renoveerimisele on suur osa hoonefondist vajalik lähimatel kümnenditel ka asendada.

Euroopa Liidu nn rohepöörde strateegia näeb ette et kogu Euroopa saavutab 2050. aastaks kasvuhoonegaaside heite neutraalsuse (EP määrus, 2020). Euroopas tarbivad hooned täna 40% kogu energiast (EC COM/2018/773, 2018) ning Eestis isegi 50% (Kurnitski et al., 2014). Hoonete energiatarbe vähendamiseks on vaja parandada hoonete energiatõhusust ning toota hoone käitamiseks vajalik energia taastuvatel viisidel kohapeal.

Üks tõhusamaid ja enamkasutatavaid viise hoone krundil taastuvatest allikatest energia tootmiseks on päikese- ehk PV-paneelide paigaldamine. Kui traditsioonilised päikesepargid on rajatud suurtele maa-aladele, kulutades väärtuslikku maad, siis järjest enam kogub populaarsust nende integreerimine hoonetega.

Vastavalt Euroopa Liidus kehtivatele direktiividele peavad vastama alates 31. detsembrist 2020 kõik uusehitised liginullenergia hoonete nõuetele (EP Direktiiv, 2010). Eestis kehtivate energiatõhususe miinimumnõuete kohaselt tähendab see uue korterelamu energiatõhusarvu alla 105 kWh/(m²a) (Hoonete energiatõhususarvude piirväärtused, 2018). Oluliselt rekonstrueeritavate korterelamute puhul on energiatõhususe nõue alla 150 kWh/(m²a). Nende nõuete täitmine on ilma päikesepaneelideta keerukas. Kuid vahel ei pruugi piisata ka kogu katusepinna katmisest PV paneelidega. Seetõttu mõeldakse järjest enam päikesepaneelide paigaldamisele seinapinnale.

2.2 Päikeseenergia sektori kasv, PV paneelide pakkumine

PV paneelide tootmine ja paigaldamine on maailmas kiiresti kasvamas. 2018. aastal ühendati võrguga rohkem uusi PV paneele kui oli kogu planeedi päikeseenergia tootmise võimsus aastal 2012 (Jäger-Waldau, 2019). Viimase kahe kümnendi jooksul on PV paneelide komponentide hind langenud üle 80%. Seda ennekõike tänu Hiina PV tööstuse kiirele arengule. 2017. aastal toodeti kokku 453 TWh päikeseenergiat, mis moodustas kogu maailma energiatootmisest 2,6% (Ritchie & Roser, 2017). 2019. aastal toodeti juba 720 TWh päikeseenergiat ja sektorile prognoositakse järgmiseks kümneks aastaks 16% aastast kasvu, mis tähendab globaalselt 3268 TWh päikeseenergia tootmist aastal 2030 (International Energy Agency, 2019)

Suurt kasvutrendi on märgata ka Eestis. 2019. aasta lõpus oli võrku ühendatud päikeseelektrijaamu koguvõimsusega 113,7 MW. 2020. aasta juuni kuu seisuga oli aga planeerimisel ja ehitamisel 419,8 MW päikeseelektrijaamu, millest valdav enamus valmis 2020. aasta lõpuks (Martinson, 2020). Oma roll oli 2020. aasta suurel kasvul ka sellel, et aasta lõpus lõppes riiklik päikeseenergia toetuskeem, kuid ka loomulik kasv oli märkimisväärne.

Selleks et päikeseenergia sektor saaks kümne aasta pärast kasvada tänasega võrreldes neljakordseks, on vaja leida vaba ruumi, kuhu neid paigaldada. Kuna elektritarbijate lähedal asuv vaba maismaapind on piiratud, siis on vajalik senisest veelgi enam jätkata arendustööd hoonetesse integreeritud PV elementide (*Building Integrated PV – BIPV*) valdkonnas.

2.3 Nõuded uuritavale tarindile

Vastavalt Eesti Vabariigi Ehitusseadustikule peab ehitis olema turvaline nii kandevõime, tulepüsivuse, kui ka hügieeni ja tervise mõttes (Ehitusseadustik, RT I, 05.03.2015, 1. § 11). Tarindist ei tohi ruumidesse imbuda tervist kahjustaval määral hallitusseente eoseid ega mürgiseid ühendeid. Fassaad peab olema püsiv ning selle osad ei tohi lagunedes inimesi ohustada. Samal ajal peab hoone olema ka energiatõhus ning loodusressursse hoidev. Viimaseid tingimusi aitab edukalt täita kerge, soojapidav ja võrdlemisi ökonoomne SILS soojustuslahendus, mille peale kinnitatud PV paneel vähendab veel omakorda hoone

energiatarvet ning fossiilsetest kütustest elektri tootmisel eralduvate kasvuhoonegaaside kogust.

Kuid enne kui sellist tarindit laialt kasutama hakata, peab olema veendunud, et fassaadi püsivus ja toimivus oleksid tagatud. Nende tingimuste täitmiseks tuleb veenduda et PV paneelide temperatuur ning niiskuse tase tarindis ei ületaks kriitilist piiri. Viimase puhul tuleb jälgida nii aja jooksul tarindisse koguneva niiskuse koguseid, kui ka märgade ehitusmaterjalide vastupidavust külmumise suhtes.

2.4 Soojus- ja niiskuslevi mehhanismid.

Niiskuskoormused

Tarindisse mahtuv niiskuse kogus sõltub tarindi kihi materjali omadustest, temperatuurist ja suhtelisest niiskusest. Seetõttu on oluline mõista nii soojus- kui ka niiskuslevi mehhanisme, saamaks aru, kuidas niiskus tarindisse ja tarindi sees liigub ja millal ta seal ohtlikuks muutub.

Soojuslevi mehhanismideks on soojajuhtivus, konvektsioon ja kiirgus. Soojajuhtivus toimib molekulide siseenergia üleandmisel tahkes materjalis ühelt kristallvõre osakeselt teisele otsese kontakti kaudu. Seda iseloomustatakse materjalide soojuserijuhtivusega (λ , W/m*K).

Konvektsioon on nähtus kus vedelik või gaas liiguvad ruumis ning koos nendega liiguvad ka soojus ja niiskus. Näiteks esineb konvektsioon liialt hõreda mineraalvillaga soojustatud puitkarkasshoone soojustusplaatide vahelistes tühimikes ning fassaadikatte taguses õhutusvahes.

Kiirgus ehk radiatsioon on nähtus, kus soojusenergia antakse ühelt kehalt teisele kontaktivabalt, elektromagnetlainete vahendusel. Seejuures on olulised kiirgava materjali pinna emissiivsus (ϵ) ja pinna neelduvustegur (A), mis iseloomustab pinnal neelduva energia hulka võrrelduna sinna langenud soojusenergiaga. Pannes päikesekiirguse kätte musta ($A=0,9$) ja valge keha ($A=0,4$), märkame mõne aja pärast, et must keha on tunduvalt soojem kui valge keha. Emissiivsus aga on materjali omadus enda soojusenergiat väliskeskkonnale ära kiirata. Mida kõrgem on emissiivsus, seda rohkem soojust ümbritsevasse keskkonda ära kiiratakse. Näiteks alumiiniumfooliumi emissiivsus on 0,07 aga kareda pinnaga mustaks värvitud keha emissiivsus on 0,95. Selle tõttu tundub termokaameraga vaadates samal temperatuuril olev poleeritud klaasiga PV paneel jahedam kui tume ja kare fassaadikrohvi pind, juhul kui kaamera seadeid vahepeal ei

muudeta. Seetõttu on oluline termografeerimisel alati määrata pindadele õiged emissioonitegurid.

Peamisteks niiskuslevi mehhanismideks ehitusfüüsika rakendustes on difusioon, konvektsioon, niiskuse liikumine raskusjõu mõjul ja niiskuse kapillaarne liikumine. Difusioon on veeauru molekulide juhuslik liikumine nende kõrgema kontsentratsiooniga alast madalama kontsentratsiooniga alasse. Kuna külmas kliimas on enamasti siseruumis rohkem veeauru kui väliskeskkonnas, siis toimub difusiooni teel veeauru liikumine läbi tarindi seest välja. Niiskuse liikumine konvektsiooniga sarnaneb soojuse liikumisele konvektsiooniga. Liikuv õhk kannab endas sisalduvaid veeauru molekule edasi. Seda nähtust kasutab ära klassikaline tuulutustahuga fassaad, kus liigne veeaur liigub konvektsiooni teel tarindist välja. Niiskuse liikumine raskusjõu mõjul on oluline nähtus näiteks mööda fassaadipinda alla valguga vee puhul. Niiskuse kapillaarne liikumine toimub veemolekulidele mõjuvate kapillaarjõudude tõttu, mis tõmbavad peenikestes poorides olevat vett kõikides suundades eemale märgunud alast. Kapillaarne niiskuslevi sõltub materjali struktuurist ja pooride läbimõõdust. (Hagendoft, 2001)

Käesolevas töös on iseäranis oluline kiirguslik soojuslevi ehk erinevate neelduvusteguritega fassaadikrohvide ja PV elementide soojenemine lühilainekiirguse mõjul. Soojenev PV element annab oma siseenergia edasi soojusjuhtivuse abil faasimuutusmaterjalile, mis kasutab selle üleliigse energia ära sulamiseks. Osa soojusenergiast antakse PV elemendi välispinnalt ära ka tuulest või temperatuuride erinevusest tingitud konvektsiooni teel välisõhule, kuid see kogus on võrreldes tavapärase mõlemalt poolt õhu liikumisele avatud päikesepaneelile oluliselt väiksem.

Niiskuslevi protsessidest on antud töö kontekstis vaja difusiooni, konvektsiooni ja niiskuse kapillaarset liikumist ära kasutades vaja lahendada probleem, mis on tingitud klassikalise seest välja liikudes järjest väheneva difusioonitakistusega materjalikihtide kombineerimise reegli eiramisest. Nimelt peaks materjalide difusioonitakistus välisseina puhul seest välja liikudes vähenema, et vältida kondenseerumist. Uuritava seina puhul on aga kõige välimise kihi difusioonitakistus väga suur, mistõttu niiskus koguneb tarindi väliskihiti, st. PV elemendi või terasest PCM kesta sisepinnale. Päikesepaneel on erinevalt fassaadikrohvist mittepõorne ning temas kapillaarset niiskuse liikumist ei toimu.

Üleliigne niiskus saab veeaurutiheda PV paneeli tagant väljuda näiteks soojustusmaterjali sees difusiooni teel, liikudes PV paneeli tagant nõ külgede poole välja, kust pääseb läbi fassaadikrohvi väliskeskkonda kuivama. Difusiooni nähtust on võimalik oluliselt võimendada, lisades veeaurutiheda kihi taha difusioonikanalid, milles veeaur kergemini liikuma pääseb. Lisaks toimib nendes difusioonikanalites ka konvektsioon, mis kiirendab

niiske õhu väljumist kanalist. Juhul kui difusioonikanal on avatud mõlemast otsast, suurendab mõningane korstnaefekt konvektsiooni mõju veelgi. Käesoleva töö kontekstis on võimalik jätta kanalites toimuva konvektsiooni nähtusega ka tagavara kasuks arvestamata, kuna ainult difusiooni teel välja kuivav tarind kuivab kindlasti välja ka difusiooni ja konvektsiooni kombineeritud mõju korral.

Difusioonikanalite tõhusus sõltub otseselt nende pikkusest. Näiteks on 1 meetri pikkuse suletud õhukanali lõpus veeauru suhteline difusioonitakistus $S_d=1$ m. Mida lühem on difusioonikanal, seda tõhusamalt ta konstruktsiooni välja kuivatab. Oluline on, et kanali avatud osa oleks kaldvihma koormuse eest varjatud. Näiteks võib kanali väliskeskkonda suubuv ots olla PV paneeli aluse plekiriba taga.

Vertikaalsed, alt avatud difusioonikanalid võivad lisaks toimida veel ka nn drenaazikanalitena, kus osa kondenseerunud veest saab gravitatsioonijõu mõjul tilkuda piki kanalit konstruktsioonist välja. Selle efekti arvutuslik modelleerimine on samuti suhteliselt keerukas, kuid võime seda efekti arvestada lisa tagavarana.

Olukorras, kus veeaurutiheda kihi taga on niiskuse kapillaarset liikumist soodustav materjal nagu krohv, on oluline roll ka kapillaarsel niiskuslevil, mis võimaldab niiskusel PV paneeli tagant külje peale välja liikuda. Selle nähtuse puhul on oluline arvestada et kapillaarne niiskuslevi hakkab domineerima alles siis kui materjali poorides on vedelal kujul vett. See aga tähendab, et tuleb panna täiendavat rõhku materjali külmakindluse uurimisele.

Lisaks viisidele, kuidas niiskus saab veeauru tiheda kihi tagant siiski välja kuivada, on oluline mõista ka mehhanisme, mille tulemusena niiskus seina sattuda võib (Hagentoft, 2001):

- Külmas kliimas on reeglina siseõhus veeauru osarõhk välisõhu omast kõrgem, mistõttu liigub niiskus difusiooni teel läbi tarindi seest välja. Mida suurem on siseõhu niiskustase ning väiksem tarindi veeaurutakistus, seda rohkem veeauru läbib tarindit.
- Mitmete ehitusmaterjalide (nagu betoon, krohv jne) paigaldamiseks ja töödeldavaks muutmiseks lisatakse materjalidesse rohkem vett kui on vaja nende keemilise struktuuri muutmiseks. Kandekonstruktsioonid ja armeerimiskrohv peavad saama piisavalt kaua välja kuivada, enne kui nende peale järgmisi kihte paigaldada. Materjalide algniiskusega tuleb alati arvestada.
- Ehituse ajal võivad materjalid sademete mõjul märguda. Näiteks renoveeritavate suurpaneel- ja telliselamute puhul on oluline vanu seinu mõned nädalad enne

ehitustööde algust sademete eest kaitsta ning neil enne soojustuse paigaldamist välja kuivada lasta.

- Õhurõhkude erinevus paneb õhu liikuma ning konvektsiooni teel võib sattuda täiendavat niiskust sademete või kõrge välisõhu suhtelise niiskuse korral ka difusioonikanalitesse.
- Igale fassaadile langeb sademete ja tuule kombineeritud mõju tulemusena kaldvihm. Fassaadikrohvidele sattunud kaldvihm voolab kas mööda fassaadi alla, aurustub krohvi pinnalt või liigub kapillaarselt läbi krohvi seina sisse.
- Juhul kui kaldvihm langeb fassaadipinnale, mis on juba eelnevalt pragunenud, on niiskusel palju lihtsam krohvi taha pääseda. Läbi pragude liikuva kaldvihma koormuse õige arvestamine on äärmiselt oluline ning fassaadi taha jõudva vee koguse minimeerimiseks on vajalik piirata pragude teket fassaadikrohvis.

Kuna uuritava tarindi PV paneelide pind vaheldub krohvipinnaga, mis ei ole veetihe, siis satub tõenäoliselt tavalise SILS seinaga võrreldes tunduvalt rohkem niiskust tarindisse läbi krohvi ning PV paneeli liitekohtade. See muudab kaldvihma koormuse osakaalu võrreldes difundeeruva niiskusega suuremaks kui traditsioonilise SILS seina puhul. Kaldvihma tõttu võib krohvikihhi taha sattuda sedavõrd palju niiskust, et see ei jõua vihma lõppedes läbi krohvi välja kuivada ning selle asemel liigub soojustuse või krohvikihhi sees veeaurutiheda PV paneeli taha, liitudes sinna koguneva siseruumist läbi seina difundeeruva niiskusega.

2.5 SILS fassaadide tüüpilisemad kahjustused

Soojusisolatsiooni liitsüsteem ehk SILS on üks kõige säästlikumaid fassaadisoojustuse süsteeme. Fassaadikatte tagust tuulutussüsteemi ei ole vaja välja ehitada kuna fassaadikrohv toimib nii viimistluskihina kui kaitseb sademete, tuule ja UV kiirguse eest. Samuti peab krohv lubama seina sattunud niiskusel välja difundeeruda. Kui aga üks ehitusmaterjal peab täitma korraga nii paljusid ülesandeid, muutuvad väga oluliseks kõik selle omadused ning paigalduse kvaliteet.

SILS on välja töötatud Saksamaal 1950. ja 1960. aastatel ning seda kasutati esmalt tellisseinte soojustamiseks. Euroopas leidis süsteem laiemat kasutust alates 1970. aastatest seoses energiakriisiga. Sealt edasi on SILSi kasutamine järjest suurenenud (Kvande et al., 2018).

Hoolimata pikaajalisest kogemusest on keskmine SILS eluiga soojas Portugali kliimas 17 aastat (Ximenes et al., 2015). Portugalis tehtud uuringud on näidanud et mõistlik oleks teha suuremahulisem inspeksioon ja vajadusel renoveerimine 10 aastat pärast SILSi paigaldust (Ximenes et al., 2015).

2016. aastal Eestis läbiviidud uuringu raames teostati viimase 6 aasta jooksul SILS-iga soojustatud korterelamute hulgast 30 näidishoone krohvisüsteemi ülevaatus ning leiti, et suur osa siinsetest SILS-iga kaetud hoonetest kipub lagunema juba väga varases staadiumis. (Liisma et al., 2016)

Enamus defektidest (51%) oli seotud krohvisüsteemi pragudega või krohvi lahti löömisega soojustuse küljest. 40% defektidest oli seotud veejooksu jälgedega, hallituse või vetikate kasvuga fassaadikrohvil ning 9% pinna ebatasasuste ning nähtavate soojustusplaatide vuukidega. Paljudel juhtudel oli märgata kahjustusi, mis on iseloomulik krohvisüsteemi paigaldamisele liiga külmas keskkonnas ($< +5^{\circ}\text{C}$). Kõige rohkem kahjustusi oli soklipiirkonnas (maapinnalt pritsiv vesi ning kapillaartõus pinnasega kokkupuutest) ning katusepiirkonnas (suurem (kald)vihmakoormus). Kõige rohkem kahjustusi esines lääne- ja põhjafassaadil. (Liisma et al., 2015)

Paljud probleemid SILS fassaadidega on tingitud kihtide vahelisest kehvast nakkest ning valest ehitustehnoloogiast (Sulakatko, 2019). Sellised defektid ilmnevad reeglina esimese kahe aasta jooksul ning tagajärjeks võib olla fassaadikrohvi asendamine. Sageli tehakse vigu ka akende ümbruse, kaabli- ja muude läbiviikude vormistamisel, mis põhjustab lokaalseid kahjustusi. Kahjustuste vältimiseks on oluline ka õigete krohvimistingimuste (õhutemperatuur ja niiskus) järgmine.

Portugali teadlased on arvutuslikult ja vaatlustega välja selgitanud, et mida jäigem on kasutatud soojustus, seda rohkem pragusid tekib krohvikihiti. Samuti oli oluliselt suurem tõenäosus pragude tekkimiseks juhul, kui soojustus oli seinaga paigaldatud nn pätsidega (Freitas & de Freitas, 2016).

Pätsidega paigaldamisest parem on nn serv-punkt meetod, kusjuures vähemalt 40% plaadi pinnast peab olema seguga kaetud (Sulakatko, 2019). Seda on võimalik küll tööde käigus pisteliselt kontrollida soojustusplaate eemaldades, kuid tegelik seguga katvus on suurema määramatusega kui oleks olukorras kus segu paigaldataks kammiga. Eestis on aga rohkem levinud serv-punkt meetod, kuna segukammiga paigaldades on raskem tagada soojustuse pealispinna loodsust ja tasapindsust, kuna kandekonstruktsioonidele on ehitamise ajal kehtinud või kehtivad suhteliselt suured lubatud tolerantsid.

2.6 Pragude teke fassaadis

Erinevalt traditsioonilisematest tuulutatava voodriga tarinditest on SILS oluliselt tundlikum pinna defektide suhtes. Ajalooliselt on fassaadikrohvid olnud paksemad, suurema

veeimavusega ja seega suurema kaldvihma puhverdamise võimega. Kaasajal kasutatavad õhekrohvid on väikese veeimavusega ning sellest tulenevalt tekib kaldvihma korral krohvi pinnale kiiresti veekelme, mis gravitatsiooni teel mööda krohvi alla valgub. Kui krohvikihiti tekib pragu, pääseb osa kaldvihma koormusest krohvipinna taha ning peab pärast läbi krohvi jälle välja liikuma. Suurem niiskuse kogunemine võib põhjustada krohvi taha kogunenud vee jäätumist talvel. Jää tekkimisega kaasneb teatavasti ruumala suurenemine ning krohv lükatakse soojustuse küljest lahti. Tekivad veel suuremad praod ning krohv võib soojustuse küljest irduda. Seega oleks kõige mõistlikum vältida esimese prao teket.

Pragude tekke sage põhjus külmas kliimas on krohvi ja soojustuse niiskumine ning nende külmumine. Külmas keskkonnas tõmbuvad materjalid kokku ning krohvikihis tekivad tõmbejõud. Kui tõmbejõud ületavad krohvi tõmbetugevuse, tekib pragu, mille kaudu satub konstruktsiooni sisse veelgi enam niiskust. Prao tekkimise seisukohalt on oluline veel ka see, et niiskunud ja külmunud krohvi tõmbetugevus on mõnevõrra väiksem kui kuival krohvil. Katsetused Eestis enam levinud krohvidega on näidanud, et pragude tekke risk algab deformatsioonidest alates 5 mm/m. (Liisma et al., 2015)

Lisaks külmumisele võib krohv puruneda ka kuumenemise tõttu. See risk on eriti suur tumedate fassaadide korral. Pea iga ehitusmaterjal paisub temperatuuri tõustes. Mida kõrgem on temperatuur, seda rohkem siseenergiat on igal üksikul materjali osakesel ja seda kiiremini osakene võngub. Mida kiiremini osakesed võnguvad, seda rohkem on neil selleks ruumi vaja. Seetõttu muutub ka krohv kõrgematel temperatuuridel pisut suuremaks ning jahtudes tõmbub kokku. Kindla materjali temperatuuripaisumise intensiivsust iseloomustab temperatuuripaisumise tegur α ($m/(m \cdot K)$).

Samamoodi paisuvad materjalid, kui nende pooride veesisaldus suureneb. Absoluutselt kuiv materjal koosneb materjali osakestest ja poorihüst. Kui täita osa pooridest veega, avaldab õhust tunduvalt suurema tihedusega vesi poori seintele rõhku. Seetõttu koormus poori seinale suureneb ja materjal tervikuna muutub suuremaks. Niiskuse vähenedes aga tõmbub materjal kokku. Seda kui palju materjalitüki pikkus niiskuse muutumise tõttu muutub, iseloomustab materjali niiskuspaisumise koefitsient β $m/(m \cdot (m^3/m^3))$.

Prao tekke seisukohast on kõige ohtlikum olukord, kus fassaadi krohvimine toimus niiskes ja soojas keskkonnas. Kõige suuremad krohvi kokkutõmbumisest tingitud deformatsioonid tekivad külmal talvel, kui sademeid on vähe, päike on päeval krohvi välja kuivatanud ja öösel langeb temperatuur väga madalale. Krohvis tekkivad tõmbepinged ei tohi olla suuremad, kui on prao tekkele vastav krohvi tõmbetugevus. Niiviisi saab paika panna krohvitud pinna suurima lubatud joonpikkuse, mis on vajalik prao tekke vältimiseks.

Täiendavat pragude teket võivad mõjutada töö kvaliteedi kõikumine, krohvikihi ebaühtlane paksus, soojustusplaatide kaardumine (mille vältimiseks on vajalik liimsegu võimalikult ühtlane jaotus) ning liiga niiskele, UV kahjustustega või tolmusele aluspinnale krohvimine, samuti krohvi liiga kiire või liiga aeglane kuivamine.

Samuti mõjutab pragude teket krohvipinna geomeetria, kaablite läbiviigud, ventilatsiooni õhuvõtuavad, aknaavad, PV paneeliga tarindi ja tavalise SILS seina liitekohad jne. Kõik need elemendid nõuavad täiendavat armeerimist või täiendavaid deformatsioonivuuke. Lisaks arvutuslikele deformatsiooniprofiilidele on kindlasti vaja deformatsiooniprofiilid paigaldada kandekonstruktsiooni deformatsioonivuukide kohtadesse. Tähtis on ka see et deformatsioonivuugi teostus oleks veekindel. Vastasel juhul ei ole deformatsioonivuuk eriti palju tõhusam kui pragu seinas.

2.7 Hoone energiatootmise maksimeerimine

Euroopa hoonetele kehtestatud nõuetes on kirjas et hoone peab olema energiatõhus ning loodusressursse säästev (EP Määrus, 2011). Kohapeal elektrienergia tootmine on suur samm fossiilsete kütuste põletamise vähendamise suunas, kuid olulised on ka päikesepaneelide tootearenduse, valmistamise ja ümbertöötlemise keskkonnamõju vähendamine ning nende tootlikkuse maksimeerimine. PV paneelide kasutegur aga langeb nende pinnatemperatuuri tõustes. Seetõttu tasuks kasutada passiivseid meetodeid PV paneelide jahutamiseks, mis väldiks nende ülekuumenemist ja tagaks nende pika eluea ning ei tarbiks seejuures ise lisaenergiat. See suurendab taastuvenergia tootmise mahtu objektil ja lükkab edasi PV paneelide kasutusea lõppemisest tingitud jäätmete ümbertöötlemise vajadust.

Eesti Vabariigis kehtivate hoone energiatõhususe miinimumnõuetes on toodud välja, et päikeseenergiast lokaalselt taastuvenergiat tootva süsteemi osa paigaldatakse juhul, kui see on majanduslikult põhjendatud ja tehniliselt teostatav (Energiatõhususe nõuete erisused..., 2018). Seejuures majanduslikult põhjendatuks loetakse päikeseenergiast süsteemi, mille aastane tootlikkus on vähemalt 70 protsenti optimaalselt suunatud päikeseenergiast süsteemi aastasest tootlikkusest. Optimaalseks suunatud päikeseenergiast süsteemiks loetakse kaldenurgaga 40 kraadi lõunasse suunatud ning pidevalt varjutamata päikeseenergiast süsteemi, mis reeglina asub hoone katusel. (Energiatõhususe nõuete erisused..., 2018)

Käesolevas töös käsitletud lahendus, kus PV paneele paigaldatakse katuse asemel lõunafassaadile, ei pruugi paraku nendele tingimustele vastata, eriti siis kui võrreldes katusele paigaldatava PV paneeliga langeb täiendavalt veel ka PV paneelide kasutegur nende ülekuumenemise tõttu. Seetõttu on vajalik võtta kasutusele täiendavad meetmed,

et tagada PV paneelide maksimaalne tootlikkus ning võimalikult pikk eluiga. Juhul kui paneelide kasuteguri langemise tõttu ei õnnestu 70% reeglit täita, siis ei pruugi olla PV paneelide paigaldamine enam majanduslikult otstarbekas ning energiatõhususe tõendamisel saab PV paneelidega arvestada vaid osaliselt. Samas on PV paneelide hind langustrendis ning paar aastat tagasi või ka täna majanduslikult ebaotstarbekas lahendus võib olla tulevikus igati mõistlik.

2.8 Fassaadi ülekuumenemisest tingitud PV paneelide efektiivsuse langus

Päikesepaneelid on tumeda pinnaga selleks, et neelata võimalikult palju soojuskiirgust. Kuid sellest energiast suudetakse enamiku paneelide puhul elektrienergiaks muuta vaid 15-20%. See tähendab, et ülejäänud energia muundub soojuseks. Soojus aga omakorda vähendab PV elemendi kasutegurit.

Kasutegurit teades on võimalik arvutada PV paneelile langevast kiirgusest toodetav elektrienergia PV elemendi klemmidel (W/m^2).

$$E_{\text{electrical}} = \eta_{\text{cell}} E$$

Selle kasuteguri leidmise valemi võib kirja panna järgnevalt (Khanna et al., 2017) (Rajvikram & Sivasankar, 2019):

$$\eta_{\text{cell}} = \eta_{\text{ref}} [1 + \beta(T - T_{\text{ref}}) + \gamma \ln(\frac{E}{1000})]$$

Kus:

η_{cell} – päikesepaneeli temperatuurikorrigeeritud kasutegur (%)

η_{ref} – päikesepaneeli standardtingimustel mõõdetud kasutegur (%)

β – päikesepaneeli tõhususe temperatuurist sõltuv vähenduskoeffitsient (K^{-1}).

Tüüpilised väärtused võiksid olla:

silikoonelemendi (*Monocrystalline Silicon Cell*) jaoks $\beta = -0,0045 \text{ K}^{-1}$

õhukese PV elemendi (*Dye-sensitized Cell*) jaoks $\beta = -0,001 \text{ K}^{-1}$

orgaanilise PV elemendi (*Perovskite Cell*) jaoks $\beta = -0,005 \text{ K}^{-1}$

T – päikesepaneeli tegelik pinnatemperatuur mingil ajahetkel ($^{\circ}\text{C}$)

T_{ref} – päikesepaneeli katsetamise standardtemperatuur

silikoonelemendi (*Monocrystalline Silicon Cell*) jaoks $T_{\text{ref}} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$

õhukese poolläbipaistva PV elemendi (*Dye-sensitized Cell*) jaoks $T_{\text{ref}} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$

õhukese orgaanilise PV elemendi (*Perovskite Cell*) jaoks $T_{\text{ref}} = 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$

γ – radiatsioonikoefitsient (*irradiance coefficient*). Näiteks $\gamma = 0,085$

E – päikesekiirgus meie uuritava pinnale (W/m^2)

1000 – päikesekiirgus standardsel PV paneeli laborikatsel on 1000 W/m^2

Kusjuures kiirgus E peab sisaldama nii otsese päikesekiirguse, pilvedes hajunud päikesekiirguse ja maapinnalt peegeldunud kiirguse komponente. Samuti peab olema kiirgus teisendatud uuritava pinnale – antud töö puhul vertikaalsele seinale.

Antud valemist on näha, et päikesekiirgus mõjutab kahte komponenti – esiteks tõuseb kiirguse mõjul PV paneeli pinnatemperatuur ning teiseks mõjutab kiirgus kasutegurit ka läbi teise komponendi, mis alla 1000 W/m^2 kiirguste korral vähendab pisut kasutegurit, suuremate kiirguste korral aga suurendab. Kuna suurem osa ajast on PV paneelile langeva kiirguse intensiivsus madalam, kui 1000 W/m^2 , on võimalik valemit lihtsustada, võttes temperatuurivähendus koefitsiendi absoluutväärtuselt pisut suuremaks.

Reaalsetel mõõtmistel on andnud suhteliselt usutavaid tulemusi mono- ja polükristalliseeritud silikoonil (*c-Si*) põhinevate PV elementide kasuteguri arvutuseks temperatuuri vähenduskoeffitsient $0,65\%/K$ (Radziemska E., 2003).

Seda numbrit on võimalik kasutada lihtsustatud tagavara kasuks arvutava valemiga *c-Si* PV elementide jaoks:

$$\eta_{cell} = \eta_{ref} [1 - 0,0065(T - 25)]$$

Kus:

η_{cell} – *c-Si* PV paneeli temperatuurikorrigeeritud kasutegur (%)

η_{ref} – *c-Si* PV paneeli standardtingimustel mõõdetud kasutegur (%)

T – Päikesepaneeli tegelik pinnatemperatuur mingil ajahetkel (K)

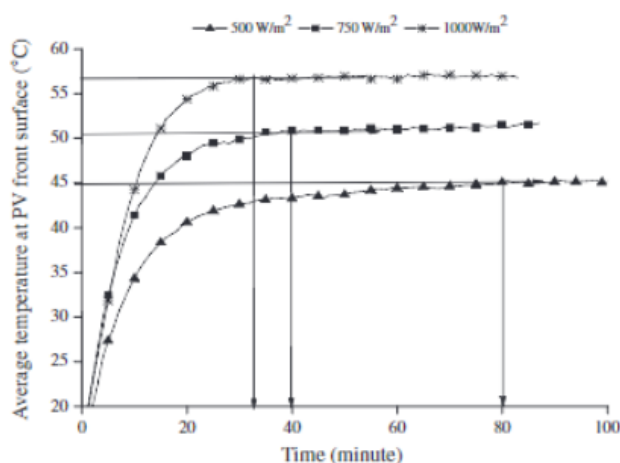
Tänapäevastel PV paneelidel on temperatuuri vähenduskoeffitsiendid reeglina väiksemad. Näiteks painduvatel PV paneelidel (FPV) on tüüpiline vähenduskoeffitsiendi suurusjärg $0,35\%/K$ (Flisom AG, 2021) (SunPower, 2018). Mida väiksem on temperatuuri vähenduskoeffitsient, seda vähem sõltub tootlikkus PV paneeli pinnatemperatuurist ning seda väiksem mõju on erinevatel jahutusmeetoditel PV paneelide tootlikkusele.

Kuigi tänasel päeval on endiselt enim levinud PV paneelide tüübid kristalliseeritud silikoonil põhinevad, siis viimastel aastatel on oluliselt kättesaadavamaks muutunud õhemad ja painduvad PV paneelide tüübid nagu amorfse silikooni (*amorphous Silicon; a-Si:H*), kaadium telluriidi (*Cadmium Telluride; CdTe*) ja orgaaniliste materjalide (*Organic*

Photovoltaics; OPV) baasil toodetud paneelid. Nende õhem konstruktsioon võimaldab kärpida tootmise materjalimahukust ning neid on võimalik painutada ja paigaldada otse konstruktsioonile. (Toledo et al., 2020)

Ka käesolevas töös käsitletav sein on mõistlik katta õhukese PV paneeliga. Oluline on seejuures defineerida täpne PV paneeli tehnoloogia, kuna erinevatel paneeli tüüpidel on erinevad temperatuuri vähenduskoeffitsiendid. Seetõttu on mõni paneel ülekuumenemise suhtes tundlikum kui teine.

2010. aastal A. Hasani poolt laboris katsetatud traditsioonilise c-Si PV paneelide pinnatemperatuurid saavutasid ühtlase taseme ca 20...80 minutilise ühtlase kiirgusenergia mõjul (Joonis 3). 1000 W/m² kiirguse mõjul kerkis PV pinnatemperatuur 57 kraadini. 750 W/m² kiirguse mõjul 51 kraadini ning 500 W/m² kiirguse mõjul 45 kraadini. Katse ajal oli keskkonna temperatuur 20 ± 1°C, tuule mõju oli katseruumis minimaalne ja PV paneelid olid paigaldatud soojustuse peale. (Hasan et al., 2010)



Joonis 3. Soojustuse peale paigaldatud c-Si PV paneelide temperatuuride tõusu kiirus konstantse kiirguse mõjul. (Hasan et al., 2010)

Hispaanias, Murcias läbi viidud katsetuste käigus selgus et kiirguse 300 W/m² mõjul suureneb lõunafassaadil paikneva ilma lisa jahutusega traditsioonilise c-Si PV temperatuur +13°C võrra, painduvate paneelide puhul jäi temperatuuri tõus mõnevõrra madalamaks (vastavalt a-Si:H +10°C, CdTe ja OPV +9°C) (Toledo et al., 2020). Sellest võib järeldada et painduvate PV paneelide temperatuurid on suurusjärg [((13-9)/13)*100% = 30% madalamad kui traditsiooniliste PV paneelide temperatuurid.

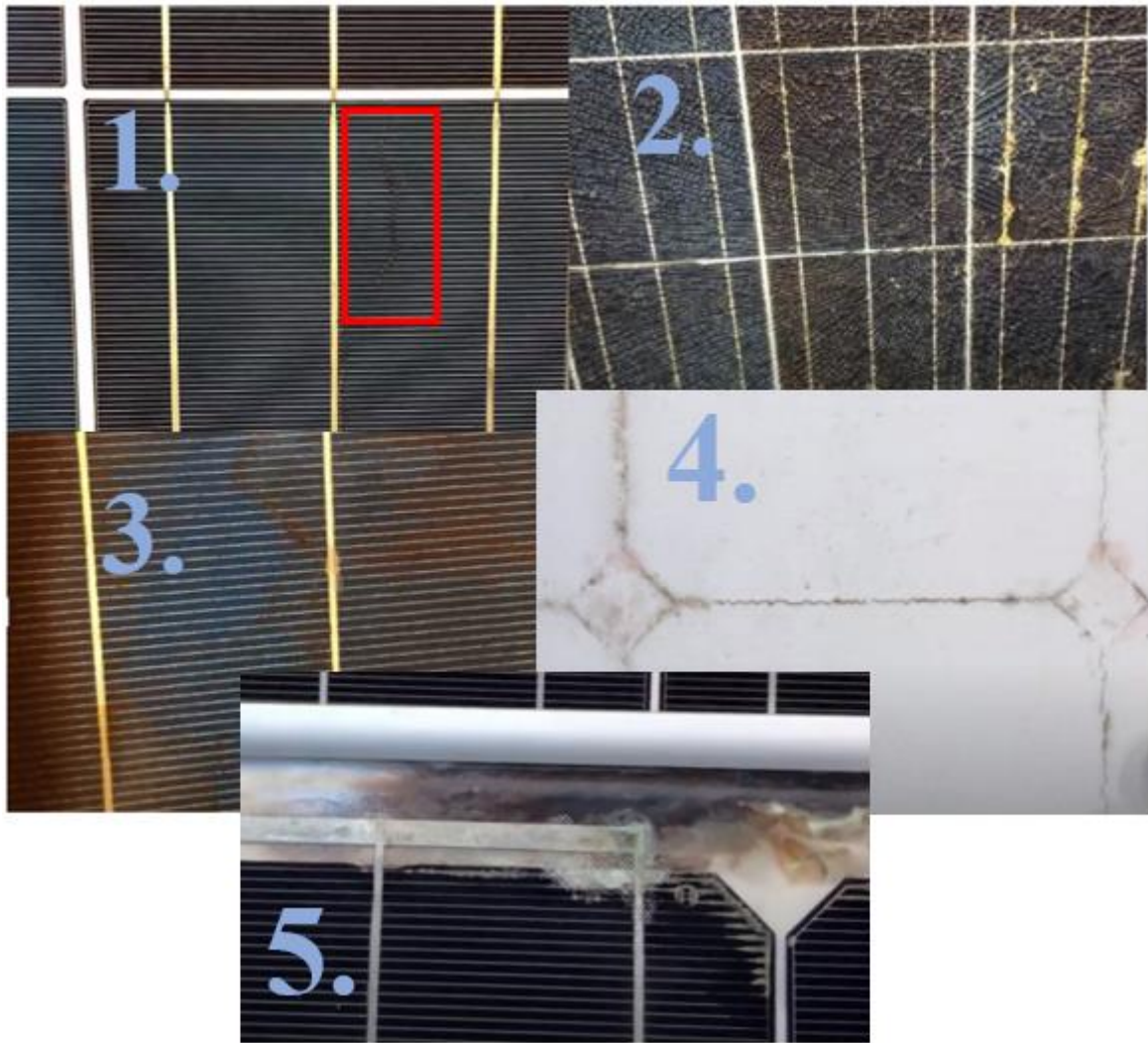
See tähendab, et täiendav jahutus annab õhukeste ja painduvate PV paneelide puhul väiksema efekti energiatootlikkuse suurenemises. (Browne et al., 2015) Küll aga mõjuvad ekstreemselt kõrged temperatuurid siiski PV paneelide eluiga lühendavalt.

2.9 PV paneelide ülekuumenemisest tekkivad kahjustused

PV paneelide soovituslik töötemperatuuri vahemik on -40°C kuni 85°C (Hasan et al., 2015). Kuid kuumas kliimas võivad tõusta ilma jahutusega PV paneelide temperatuurid oluliselt kõrgemale. Näiteks Liibüas on mõõdetud PV paneeli temperatuuriks $125,4^{\circ}\text{C}$, mis tõi endaga kaasa kasuteguri, mis moodustas vaid 69% laboris mõõdetud kasutegurist. (Nassar & Salem, 2007)

Kuid lisaks kasuteguri vähendamisele, mõjub kõrge pinnatemperatuur PV paneelide struktuurile halvasti. Tüüpiliste PV paneelide probleemid on enamasti seotud suurte temperatuurideformatsioonidega.

Suur temperatuuride kõikumine tekitab suuri deformatsioone, mis võivad tekitada PV-elementides mikropragusid või purustada nende katteklaasi. Kui üksikusse PV elementi tekib pragu, siis muutub ta elektritootjast takistiks. Teiste elementide poolt genereeritud elektrivool liigub läbi selle takisti ning seal muudetakse vajalik elektrienergia veel täiendavaks soojuseks. See suurendab veelgi temperatuurideformatsioone ja kahjustused hakkavad levima. Samuti võib ülekuumenemise tõttu puruneda PV paneeli pealmine klaas või tagumine kattekiht. Nende purunemisel satub niiskus PV paneeli sisse ja loob soodsad tingimused hallituse kasvuks. (Gold Coast Solar Power Solutions, 2019)



Joonis 4. Foto 1 – Temperatuuri kõikumisest tekkinud mikropragu PV-elemendis. Foto 2 – Temperatuuri kõikumise tõttu purunenud katteklaas. Foto 3 – Kui suur kogus fotoelemente on purunenud, muutuvad nad takistiteks, mistõttu hakkab ülejäänud paneeli toodetav elektrivool neid kütma. Pildil on selle tõttu ära kõrbenud fotoelement. Foto 4 – Temperatuurideformatsioonide või külmumise mõjul purunenud PV paneeli tagakülje kattekiht. Sealt kaudu liigub niiskus paneeli sisse. Foto 5 – Paneeli sisse sattunud niiskus tekitab katteklaasi taga hallituse kasvuks soodsa keskkonna. (Gold Coast Solar Power Solutions, 2019)

2.10 Võimalused PV paneelide jahutamiseks

Varasemalt on paigaldatud PV paneele koos jäiga karkassiga tarindist eemale, võimaldades konvektiivse õhuvoolu paneeli taga, mis paneeli jahutab. See aga muudab konstruktsiooni raskemaks, keerulisemaks ning lõpptulemus ei pruugi olla esteetiliselt kõige parem.

Arvutuslikult on tõestatud et katusel paikneva PV paneeli jahutamiseks paneeli taguse konvektsiooni teel on vaja ülekuumenemise vältimiseks 45-kraadise katuse puhul ca 120mm suurust läbivat tuulutusvahet, vertikaalse seina puhul piisab 100mm laiusest tuulutusvahest (Gan, 2009).

Soovides paigaldada PV paneele otse tarindi pinnale, ei ole võimalik kogu paneeli ulatuses 100mm laiust tuulutusvahet tagada, mistõttu täielikult konvektsiooni teel jahutamine ei ole võimalik. Konvektsiooni oleks võimalik ära kasutada vaid kitsastes õhukanalites.

Üheks lahendusvariandiks võiks olla õhutuskanalites õhuvoolu intensiivsuse suurendamine kasutades ventilaatoreid. Kuid need teevad lahenduse kallimaks ning töökindlus väheneb (Hasan et al., 2010).

Võimalik oleks kasutada paneelide jahutamiseks ka vesijahutust. Paneeli taha paigaldatud torudes voolav vesi suudaks PV elemente jahutada ning sooja vett saaks kasutada tarbeveena. Küll aga on selle lahenduse probleemiks tehniline keerukus, veetorude külmumine talvel ja ulatuslikud niiskuskahjustused fassaadil juhul kui veetoru peaks lõhkema või tema pinnal peaks veeaur kondenseeruma. Samuti tarbivad kõik aktiivsed jahutusmeetodid elektrienergiat (tsirkulatsioonipumba töös hoidmiseks), mis vähendab PV paneelide jahutamisest saadavat kokkuhoidu. Katsetatud on ka PV paneelide välispinna kastmist veega, kuid ka see on energiamahukas ning hoone niiskusturvalisuse seisukohast ohtlik.

2.11 Faasimuutusmaterjalide mõju PV paneelide temperatuuridele

Passiivse jahutusvõimalusena uuritakse järjest enam faasimuutusmaterjalide (PCM) kasutamist PV elementide taga (Hasan et al., 2015). Faasimuutusmaterjal on kindla sulamistemperatuuri ja võrdlemisi suure sulamissoojusega materjal. Kasutades ära faasimuutust, on võimalik saavutada teatud temperatuurivahemikus väga suur termiline mass suhteliselt väikese reaalse materjali massiga. Uuritud on PCM materjali võimalikku

asukohta tarindi sees ning kõige efektiivsemaks osutus PCM-i paigaldamine tarindi välismise osasse, vahetult PV paneelide taha (Heim & Wieprzkowicz, 2016).

Katsetega on tõestatud et PCM-e kasutades on võimalik saavutada PV paneelide temperatuuri langust 1000 W/m^2 kiirguse korral 18°C võrra 30-ks minutiks ning 10°C madalamat temperatuuri oli võimalik hoida lausa 5 tundi (Hasan et al., 2010). Suurim PCMi eelis aktiivsete jahutusmeetodite ees on see et materjal võib läbi teha tuhandeid sulamistsükleid ilma et selleks oleks vaja väliselt sekkuda. Samuti ei ole ohtu et pump või ventilaator lakkab töötamast.

Ideaalselt dimensioneeritud PCM sulab päevase intensiivse päikesekiirguse perioodi lõpuks täielikult ära. Kui päike on loojunud ning PV paneel enam elektrienergiat ei tooda, siis hakkab PCM endasse akumulierenud soojust väliskeskkonda ära andma. Kuna öösel ei ole võimalik päikeseseenergiat toota, siis ei muuda ka PCM-i tahkumisprotsessi aegne kõrgem PV paneeli pinnatemperatuur kokkuvõttes elektri tootlikkust.

Ühe näidisööpäeva väljavõte Indias tehtud uuringust näitab, et c-Si PV paneeli efektiivsus kasvas PCM-iga jahutades keskpäevastel tundidel ca 10% võrra (jahutamata PV paneeli efektiivsus oli 13,5%, PCM jahutusega paneeli efektiivsus 15%). Kusjuures samal ajal termokaameraga mõõdetud PV pinnatemperatuurid olid vastavalt $55,4^\circ\text{C}$ jahutamata paneelil ja $42,5^\circ\text{C}$ PCM passiivjahutusega paneelil. (Rajvikram & Sivasankar, 2019).

Araabia Ühendemiraatide ja Iirimaa teadlaste ühisprojektis uuriti c-Si PV paneelidele PCM kihi lisamise mõju nende pinnatemperatuuridele arvutusmodelite ning katsetega nii Iirimaal, Dublinis kui ka Pakistanis, Veharis. Tegemist oli tagant tuulduva lahendusega, kus PV paneele jahutasid korraga nii välisõhu konvektsioon kui PCMi sulamisprotsess. Mõõdetud tulemustest analüüsiti ühte kõrge päikesekiirguse intensiivsusega ööpäeva suvel. Iirimaal oli PCM-iga jahutatud PV paneeli pinnatemperatuur kõrghetkel 10°C madalam (49°C tavaline PV; 39°C koos PCM-iga). Pakistanis oli erinevus lausa 21°C madalam (63°C tavaline PV; 42°C koos PCM-iga).

Elektrienergia väljundvõimsuse erinevused olid tootlikkuse kõrghetkel Iirimaal 5,1% ja Pakistanis 13% kõrgemad kui ilma PCM jahutusega paneelidel. Lisaks selgus et arvutatud ja reaalselt mõõdetud temperatuurid olid üsna sarnased (maksimaalsed erinevused 6,3%). (Hasan et al., 2015)

Nendest tulemustest sai järeldada et PCMi energiatootlikkust suurendav efekt on palju märkimisväärsem stabiilselt soojas ja päikeselises kliimas. Ookeanilises Iirimaa kliimas ei ole süsteem nii efektiivne. (Hasan et al., 2015)

Oluline on märgata et eelmainitud uuringute tulemused keskenduvad peamiselt ajaperioodidele mil faasimuutusmaterjal saab toimida (üks päev või paar päeva, mil õhutemperatuur ja kiirus on soodsad). Reaalse lahenduse puhul on aga oluline arvestada ka ajaperioodiga mil väljas on PCM-i sulamiseks liialt külm (talvel) ning PV paneeli tootlikkus on PCM-i peal täpselt sama suur kui ilma PCM-ita. Reaalselt rakendatava tarindilahenduse kontekstis oleks olulisem analüüsida kogu aasta summaarse elektrienergia toodangu erinevust, mis on tunduvalt madalam kui suviste keskpäevaste hetketoodangu maksimumväärtuste erinevused.

Täpse faasimuutusmaterjali sulamistemperatuuri ja koguse dimensioneerimine sõltub konkreetsest kliimast. Sageli võib osutada tõhusamaks hoopiski kahe faasimuutusmaterjali kombinatsioon. Kahe erineva PCM-i kombineerimist ja erineva kujuga kambrieste mõju PCM süsteemi tõhususele on arvutuslikult uuritud (Jun Huang, 2011). Uuringust selgus et kõige tõhusam viis PV paneelide jahutamiseks Suurbritannia kliimas oli 21°C ja 27°C nominaalse sulamistemperatuuriga PCM-ide kombineerimine vahekorras 1:1.

Vaja on arvestada ka sellega et PCM-i passiivne toime ei kesta päris igavesti ning see väheneb ajas. Mitmest anorgaanilisest komponendist kombineeritud faasimuutusmaterjalid kestavad kuni 5000 sulamis-tahkumis tsükli. Mõnede konkreetsete anorgaaniliste PCM-ide puhul on leitud et kogu sulamisel neelduv soojushulk vähenes 1100 tsükli järel 5%. Enamuste puhul pole aga 1000 tsükli järel muutusi veel märgata. (Duraković, 2020)

Orgaanilised PCMid seevastu võivad kaotada 10% oma soojusmahtuvusest juba pärast 450 sulamistsükli. Samuti on orgaaniliste PCMidide puhul probleemiks nende kuni 10% mahumuutused (Duraković, 2020). Orgaaniliste PCMidide eeliseks on aga nende keskkonnasõbralikkus ning süsinikneutraalne tootmine.

2.12 PCM-i mikrokapseldamine

Üks enamlevinud meetod PCM-i mikrokapseldamiseks on tema paigutamine väikestesse mittesulavast materjalist graanulitesse. Graanuli kest ei tohi lahustuda ei vees (sest tarindi väliskihis on niiskust) ega ka orgaanilistes lahustites (sest PCM võib koosneda mitmetest erinevatest parafiinidest ja rasvadest). Lisaks peab kest olema elastne et pidada vastu PCM-i mahupaisumisele sulamisel. Sobiv materjal kapseldamiseks on näiteks polüuretaan.

Korrektse mikro kapseldatud PCM terakesi saab segada näiteks betooni või krohvisegu sisse. Küll aga on mitmed uuringud näidanud et maksimaalne mahuprotsent, mille juures betooni tugevusomadused oluliselt ei vähene on kuni 5% PCM sisaldust. (Marani & Nehdi, 2019). Samas võib teatud omaduste muutumist teatud tingimustel ka lubada.

Prantsusmaal ja Jaapanis on katsetatud ka erinevates kogustes mikro kapseldatud PCMi lisamist tsementmörtidesse. Polümeersete kapslite läbimõõt oli 5–25 µm ning ilma et mõrdi mehaanilised omadused ja töödeldavus liigselt väheneksid, oli mõistlik kapseldada kuni 15 massiprotsenti PCM-i. 15% PCM lisandiga mõrdi survetugevus oli seejuures 70% madalam võrreldes ilma lisandita mõrdiga. (Djamai et al., 2019)

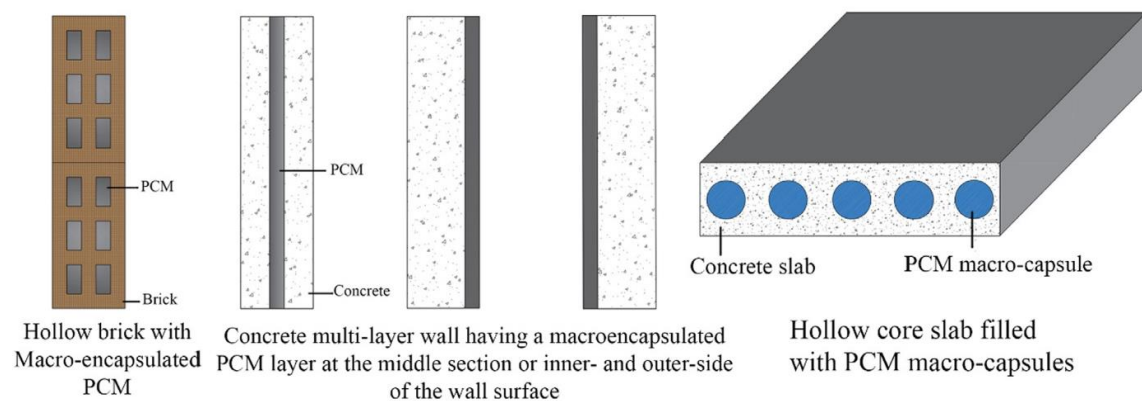
Taiwanis on arvutuslikult uuritud ka PV paneeli taha paigaldatud 5cm paksuse mikro kapseldatud PCMi sulamisprotsesse. Tulemustest selgus et kogu põhimaterjali ulatuses ei jõudnud PCM päikesekiirguse mõjul ära sulada ja üle poole materjalist ei hakanudki kunagi tööle. Suvel õnnestus saavutada maksimaalselt 2 kraadine PV temperatuuri langus (49°C tavaline PV; 47°C koos PCM-iga) ja talvel 4,5 kraadine langus (35°C tavaline PV; 30,5°C koos PCM-iga). Kusjuures mikro kapseldatud PCMi sulamistemperatuur oli 26°C (Ho et al., 2012). Siit võib teha järelduse et kuna mikro kapseldamisel ei ole võimalik põhimaterjali siduda piisavalt palju PCM-i, siis jääb soojusmahtuvus liiga väikeseks et saavutada soovitatavat efekti.

Teoreetiliselt või olla võimalik saavutada püsivamad PCM graanulid, kasutades tsementmõrdi asemel orgaanilist fassaadimõrti (nt *Sto Armierungsputz*) ning vähendades PCM-i mahukahanemiste mõju, segades faasimuutusparafiini näiteks alumiiniumpulbriga. Siiski on selline lähenemine veel värske ning selliste materjalide arendus on Euroopas alles algusfaasis.

2.13 PCM-i makrokapseldamine

Makrokapseldamine võimaldab võrreldes mikro kapseldamisega siduda samasse ruumalasse oluliselt rohkem PCMi ja seeläbi on võimalik saavutada sama ruumala juures oluliselt suurem termiline mass. Samuti ei halvenda makrokapseldatud PCM põhimaterjali füüsikalisi omadusi. (Marani & Nehdi, 2019)

PCMi makrokapseldamisel otse konstruktsioonielemendi sisse on oluline tagada tema vedelikukindlus. Kuna betoon ise ei ole veetihe, siis paigaldatakse näiteks õõnespaneelide õõntesse faasimuutusmaterjale silindriliste polümeeridest või metallist kapslite abil. (Marani & Nehdi, 2019)



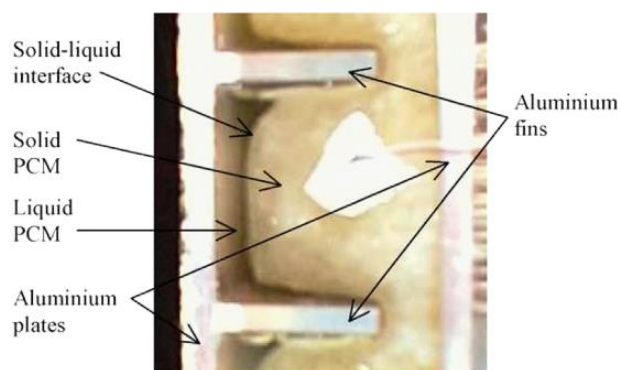
Joonis 5. Võimalused PCM-i kapseldamiseks laialtlevinud konstruktsioonelementidesse. (Marani & Nehdi, 2019)

Hong Kongi teadlased katsetasid 2014. aastal 20mm paksusesse teraskesta makrokapseldatud faasimuutusmaterjaliga, mis oli paigaldatud betoonseinte pinnale. Vähendatud mõõtetega hoone mudelitega tehti kolm katset, kus paigaldati roostevabast terasest kapslites PCM nii betooni sisepinnale, välispinnale ning ka kahe betoonikihi vahele. Sisekliima ühtluse tagamiseks oli ootuspäraselt kõige tõhusam seina sisepinnale paigaldatud PCM (Shi et al., 2014). Kuna tegemist oli miniatuurse mudeliga, siis 20mm teraskapsli sisse jäikusribisid ei paigaldatud.

Paremaks soojuslikuks toimivuseks on oluline et ümbrismaterjalil oleks võimalikult kõrge soojuserijuhtivus. See võimaldab faasimuutusmaterjalil kogu kihi ulatuses intensiivsemalt sulada. (Marani & Nehdi, 2019)

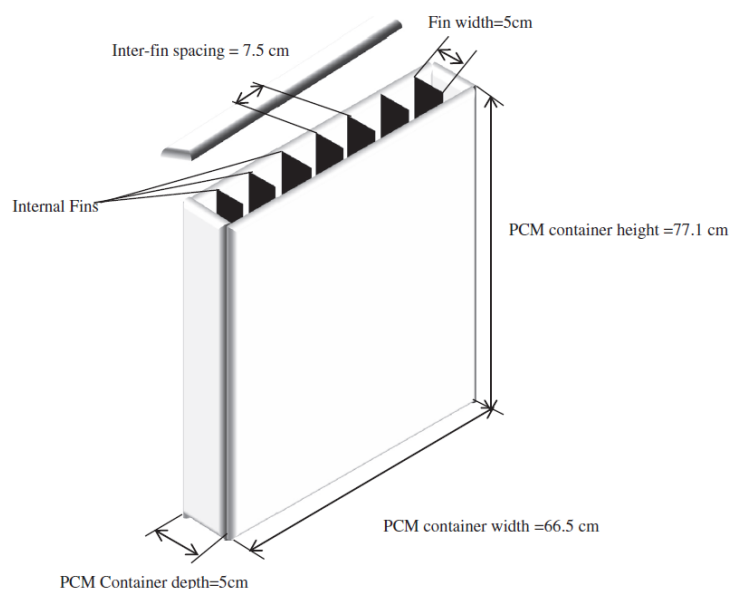
Käesoleva töö raames prooviti teostada arvutusi samuti roostevabast terasest kesta sisse kapseldatud PCM-iga. Kuid selgus et PCM sulas vaid välispinnalt ning suur osa materjalist ei jõudnudki sulada. Seejärel prooviti asendada roostevaba teras suurema soojuserijuhtivusega tavalise terasega ning seejärel alumiiniumiga ning tulemus paranes. Kuid tõhusam moodus PCMi ja kesta summaarse soojuserijuhtivuse parandamiseks on kesta sisse jäikusribide lisamine. Samas võimaldab alumiiniumkapsel muuta kogu tarindilahenduse tunduvalt kergemaks.

Browne on oma töös uurinud ribide mõju PCMi sulamisefektiivsusele ja järeldanud et ribad on olulised ka alumiiniumisse kapseldatud lahenduse puhul (Browne et al., 2015).



Joonis 6. Faasimuutusmaterjal sulab esmalt soojusallika poolses kihis. (Browne et al., 2015)

Reaalsete c-Si PV paneelide ja PCM-iga välikatseid sooritades kasutas ka Hasan PCMi makrokapseldamist alumiiniumist ribilise karkassi sisse (Hasan et al., 2015). Tema tulemused näitasid et PCMi päikesepoolse pinna ja tagumise poole pinna temperatuurid küll erinesid veidi, kuid see oli tingitud pigem sellest et PCM kapsli tagumine külg oli välisõhu konvektsioonile avatud.



Joonis 7. Faasimuutusmaterjalide makrokapseldamiseks mõeldud 5mm paksusest alumiiniumist (klass 1050A) ribiline kest c-Si PV paneelide taha liimimiseks. Mahupaisumise vältimiseks jäeti ülemine 100mm PCMiga täitmata. Alumiiniumkapsel liimiti PV paneeli tagaküljele epoksiidliimiga. (Hasan et al., 2015)

Kasutades jäika terasest või alumiiniumist kesta, tuleb kindlasti arvestada faasimuutusmaterjali mahumuutustega, kuna faasimuutusmaterjalide tihedus on tahkel kujul ca 10% suurem kui vedelal kujul. (Rubitherm, 2021) Lihtsaim lahendus selle probleemi lahendamiseks on metallkesta täitmine vedelal kujul faasimuutusmaterjaliga, mis siis tahkeks muutudes mahukahaneb ning ülemise osa tühjaks jätab. Teine võimalus on kasutada elastse perimeetriga kapslit, kus kummitaoline serva lint võimaldab kapseldatud faasimuutusmaterjalil mahus kasvada.

3. MEETOD

3.1 Soojus- ja niiskuslevi arvutuse tarkvara ja ääretingimuste valik

Dünaamiline soojus- ja niiskuslevi modelleerimise tarkvara *Delphin* on välja arendatud Saksamaal, Dresdeni Tehnikaülikoolis (Grunewald, 1996; Nicolai, 2008). *Delphini* tarkvaraga on võimalik modelleerida soojuse, niiskuse, saasteainete ja soolade liikumist tarindites. Tarkvara on tunnistanud usaldusväärseks ja arvutuslike tulemuste reaalsusele vastavust on kontrollitud mitmetes uuringutes (Ilomets, 2017).

Delphini kasutatakse sageli külmasildade kriitilisuse hindamiseks, niiskustehniliselt keerukate konstruktsioonide toimivuse kontrollimiseks (nagu seespoolne lisasoojustamine), tuulutatavate fassaadide ja katuste analüüsimiseks ja hallitusindeksi arvutamiseks. (Bauklimatik-Dresden, 2021)

Võimalik on teostada nii 1D, 2D kui ka 3D arvutusi. Kuid iga dimensiooni lisandumisega kasvab suuresti arvutuse keerukus ning ka arvutamise aeg. Samuti kasvab mudeli koostamise keerukus. Seetõttu on soovitatav kasutada üldjuhul 1D ja 2D analüüse.

Tarindi soojuslikku toimivust uuriti *Delphin 6* abil kolmes Euroopa kliimas (Eestis, Poolas ja Hispaanias) ning SILS-i niiskuslikku toimivust uuriti viies erinevas kliimapiirkonnas (Eestis, Soomes, Saksamaal ja kahes asukohas Norras). Kasutati kolme erinevat faasimuutusmaterjali ning kahte erinevat kapseldamise põhimõtet. Samuti uuriti faasimuutusmaterjali kinnitamiseks kuut erinevat lahendust. Arvutusi tehti kolme erineva krohvi värvitooni jaoks (valge, hall, must). Samuti uuriti erinevate niiskuskoormuste (materjalide ehitusniiskus, fassaadile sadav kaldvihm, läbi pragude fassaadi taha sattuv vesi) mõju tarindile ning võrreldi difusioonikanalite ning erinevate soojustusmaterjalide mõju tarindi niiskustasemele.

3.1.1 Arvutusmeetodi tööpõhimõte, piirangud ja lihtsustused

Delphin teostab arvutusi, mis põhinevad lõplike ruumelementide meetodil (ingl k *Finite Volume Method*). Iga valitud ajahetke jaoks leitakse arvulisi lähtetingimusi rahuldav lahend iga arvutusvõrgu ühikpinna või ühikruumi jaoks, erinevaid tundmatuid iteratsiooni teel erinevate arvudega võrdsustades, kuni on tagatud nõutav täpsus.

Süsteemi soojusliku ja niiskusliku tasakaalu olukord arvutatakse välja numbrilise iteratsiooni teel, kasutades selleks niiskuse- ja energiatasakaalu võrrandeid. Eraldi liidetavatena võetakse arvesse kõiki soojus- ja niiskuslevi mehhanisme (Grunewald, 1996; Nicolai, 2008). Delphini poolt kasutatavad niiskusliku ja soojusliku tasakaalu võrrandid ning kaldvihma koormuse arvutusvalem on leitavad Lisast 1.

Olulisemad piirangud *Delphini* arvutustarkvara juures, millele käesolevas lõputöös on püütud lahendust leida, on esmalt see, et materjalide soojus- ja niiskusdeformatsioone ei ole võimalik otse leida. Seetõttu tuleb leida väljunditena erinevate kihtide temperatuure ja niiskussisaldusi ning edasise andmetöötluse käigus arvutada vastavad deformatsioonid.

Teine suur piirang on tarkvara juures see, et PCM-ide funktsiooni sisestamine on Delphini 6-s versioonis küll võimalik, kuid oli töö kirjutamise ajal suhteliselt uus rakendus, mistõttu ei võimaldanud veel kahjuks teostada niiskuservutusi. Seetõttu on käesolevas töös tehtud kõigepealt soojuslik arvutus koos PCM-i funktsiooni sisaldava materjaliga ning hiljem on esimesest mudelist saadud temperatuurid sisestatud ääritingimusena niiskuservutuse mudelisse.

Kolmas oluline kitsendus on see, et *Delphin* ei võimalda arvestada materjalide sulamise ja tahkumise protsessi ega ka niiskumise (ehk absorptsiooni) ning kuivamise (ehk desorptsiooni) kõverate vaheliste erinevustega, s.t. hüstereesiga. Seetõttu on PCM-i siseenergia graafik saadud sulamise ja tahkumise funktsioonide keskmistamise teel ning krohvisüsteemi kuivamise ja niiskumise graafik on samuti keskmistatud üheks funktsiooniks.

Käesolevas lõputöös on tehtud veel mõned reaalsest olukorrast erinevad lihtsustused, mis teevad mudeldamise võimalikuks:

1. Vaatleme mudelites ühte seina lõiku. Lõigu otstele on rakendatud adiabaatilised ääritingimused. Arvutuslikult vastab see lõpmata pikale tarindile;
2. PCM-i mahumuutustega sulamisprotsessil ei ole arvestatud. Reaalsuses väheneb PCM-i ruumala tahkumisel, mistõttu kesta ülemine osa jääb tühjaks. Mudelis on ka ristlõike ülemises osas kogu aeg PCM olemas.
3. Sulanud olekus faasimuutusmaterjali konvektsiooniga ei ole arvestatud;
4. Faasimuutusmaterjali ruumalalise soojusmahtuvuse leidmisel on tehtud lihtsustus et nimitemperatuurist kõrgemal on materjal täielikult vedel ja madalamal täielikult tahke;
5. PCM-i metallkesta taga olevates ühest otsast avatud difusioonikanalites on konvektsiooni mõjud tagavara kasuks hüljatud.

3.2 Uuritav tarind ja materjalide ehitusfüüsikalised omadused

Käesolevas töös uuritava tarindi ristlõiked on toodud Lisas 2. Kasutatud materjalide omaduste koond on esitatud Lisas 3.

3.2.1 PV paneel

Aktiivelementide pinnal on kasutatud Flisomi eFlex FF60 õhukesi, painduvaid päikesepaneele (FPV) (Flisom AG, 2021). Deklareeritud lubatud töötemperatuuride vahemik on -40°C kuni $+85^{\circ}\text{C}$. PV on ribakujuline, laiusena 411mm ning referentstoode on pikkusega 1617mm. PV paneelide tõhususe arvutustes kasutatud elektrotehnilised parameetrid on toodud Lisas 4.

PV paneelidega niiskustehniliste arvutuste teostamiseks on lähtutud sellest, et PV paneel on metallile ja klaasile sarnanev veetihe ning õhutihe materjal ja tema veeauru suhteline difusioonitakistus on suur, $S_d=10\,000\text{m}$.

Väga oluline parameeter PV paneelide pinnatemperatuuride leidmiseks on PV paneelide neelduvustegur, mida tootja paraku ei deklareeri.

Vastavalt energia jäävuse seadusele peab kogu pinnale jõudev päikeseenergia muunduma teisteks energialiikideks või peegelduma sealt tagasi (eeldusel, et energia paneeli ei läbi). Kuna PV paneel toodab elektrienergiat, siis see energia ei saa samal ajal ja samas kohas soojuseks muutuda. Seega peame meid huvitava soojuseks muutuva kiirgusenergia koguse jaoks vajaliku neelduvusteguri leidmiseks arvestama ka PV paneeli kasuteguriga (Sami, 2018). Tüüpilise tumeda PV paneeli neelduvustegur ilma elektrit tootmata on 0,96. Võttes meie painduva PV paneeli kasuteguriks $\eta = 12\%$ (Flisom AG, 2021), saame et soojuseks muutuva kiirgusenergia leidmiseks vajalik neelduvustegur on:

$$A = A_{\text{bruto}} - \eta = 0,96 - 0,12 = 0,84$$

Ka mitmete energiaarvutusprogrammide (nt ESP-r) vaikimisi väärtus on $A=0,84$. See väärtus eeldab samuti, et PV paneel toodab parasjagu elektrit.

Seega antud sein muutub ca 12% kiirgusenergiast elektrienergiaks. 4% kiirgusenergiast peegeldub tagasi ning 84% muundub soojuseks. Selle soojusenergia peab neelama õhuke PV paneel ning tema taga paiknev faasimuutusmaterjal. Osa lahkub PV paneeli esipinnalt konvektsiooni ja kiirguse teel.

3.2.2. Krohvisüsteem

Õhekrohvisüsteemina kasutatakse Poola tootja *Sto* krohvisüsteemi, mis koosneb armeerimiskihist ja viimistluskrohvi kihist. Orgaaniliste ja mineraalsete armeerimis- ning viimistluskrohvidega on võimalik kombineerida neli toimivat kombinatsiooni. Täpsemad krohvisüsteemi omadused nelja krohvikombinatsiooni jaoks on katseliselt määratud 2021. aastal Tallinna Tehnikaülikoolis (Volkova et al., 2021).

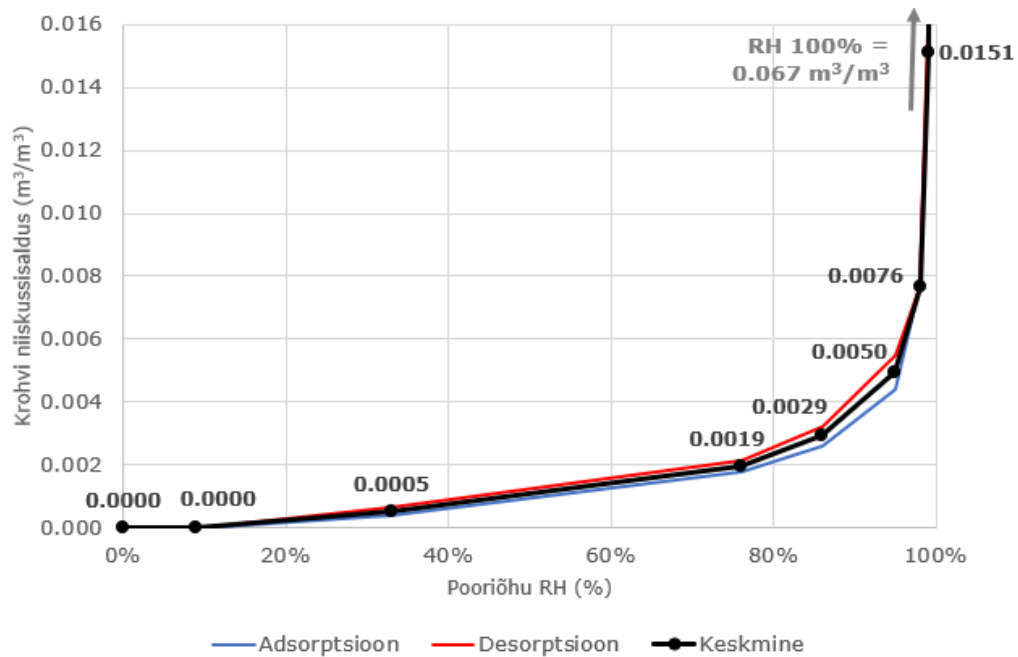
Uuringust (Volkova et al., 2021) ilmnes et nii pragude kindluse kui niiskuseliku toimivuse poolest on tavapärasest keerukama SILS fassaadilahenduse jaoks sobivamad orgaanilise armeerimiskrohvi lahendused. Kõige paremaid tulemusi andis orgaaniline armeerimiskrohv (*StoArmierungsputz*) kombineerituna silikoon-viimistluskrohvi (*StoSilco MP*). Nendest kahest krohvist koosnevat krohvisüsteemi katsetati ühe tervikuna. Seetõttu on mõõdetud omadustega vastavuse saavutamiseks mudeldatud fassaadikrohvisüsteemi ühe materjali kihina.

Kasutatud krohvisüsteemi põhiomadused on toodud Lisas 3. Lisaks on arvutusmodelites kasutamiseks täpsemalt defineeritud materjali sorptsioonkõver ning auru- ja vedelikujuhtivuse funktsioonid, mis vastavad Tallinna Tehnikaülikoolis läbiviidud mõõtmiste tulemustele.

3.2.2.1 Krohvisüsteemi sorptsioonkõver

Katseliselt mõõdeti krohvisüsteemide sorptsioonkõverad, hoides hermeetiliselt suletud karpides katsekehasid erinevate õhuniiskuste ($RH=9\%\dots 99\%$) juures kuni katsekehade massi stabiliseerumiseni (Volkova et al., 2021). Samale kõverale lisati ka ahjus kuivatatud katsekeha ($RH=0\%$) ning 24h vältel vees olnud katsekeha vedelikusisaldused.

Sorptsioonkõveraid mõõdeti katseliselt 5°C ning 24°C juures. Samuti mõõdeti eraldi adsorptsiooni (niiskumine) ning desorptsiooni (kuivamine) kõveraid. Kuna Delphini arvutusmodelisse on võimalik sisestada vaid üks sorptsioonkõver, siis kasutati 24°C juures adsorptsiooni ning desorptsiooni protsesside keskmistatud kõverat (Joonis 8).



Joonis 8. Kasutatava fassaadikrohvi (StoArmierungsputz + StoSilco MP) keskmistatud sorptsioonkõver arvutusmodelis kasutamiseks.

3.2.2.2 Krohvisüsteemi soojus- ja niiskuspaisumise koefitsiendid

Katseliselt mõõdeti krohvisüsteemi temperatuuripaisumise teguriks $\alpha = 20 \times 10^{-6} \text{ m}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (Volkova et al., 2021). Niiskuspaisumise mõõtmisel õnnestus võrrelda vaid täiesti kuiva ning märgunud krohvi (uputatud kaheks nädalaks vette), mistõttu niiskuspaisumise protsessi kujutamine lineaarsena on oluline lihtsustus. Kuiva ning märja krohvi joonmõõtmete erinevus oli 0,38 mm/m. Siiski lineaarset niiskuspaisumist eeldades ning sorptsioonkõveralt saadud niiskussisaldustega (täiesti märg krohv sisaldab $0,067 \text{ m}^3/\text{m}^3$ niiskust) arvestades saaksime niiskuspaisumise koefitsiendiks $\beta = 2,7 \times 10^{-3}$, $\text{m}/(\text{m} \cdot (\text{m}^3/\text{m}^3))$.

Mõõtmistulemuste suurusjärkude kontrollimiseks tehtav kiire kontrollarvutus näitab et kui paigaldustingimuste ja ekstreemsete ekspluatatsioonitingimuste vahel on $\Delta T = 60 \text{ K}$ (suvel $+30 \text{ }^\circ\text{C}$, talvel $-30 \text{ }^\circ\text{C}$) ning niiskuslikud ääretitingimused on täiesti märjast täiesti kuivani, siis kahest tegurist kombineeritud deformatsioon on leitav järgmiselt (Volkova, 2021):

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{\max} &= \alpha * \Delta T + \beta * \Delta w = 20 \times 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{mK}} \times 60 \text{ K} + 2,7 \times 10^{-3} \frac{\text{m} * \text{m}^3}{\text{m} * \text{m}^3} \times 0,067 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \\
 &= 0,0012 \frac{\text{m}}{\text{m}} + 0,00018 \frac{\text{m}}{\text{m}} = 0,00138 \frac{\text{m}}{\text{m}} = 1,38 \frac{\text{mm}}{\text{m}}
 \end{aligned}$$

Siit on näha, et temperatuurimuutustest tingitud deformatsioon (1,2 mm/m) on 6,7 korda suurem kui niiskuspaisumisest tingitud deformatsioon (0,18 mm/m). Seetõttu ei vii niiskusdeformatsioonide lihtsustamine lineaarseks väga suurte vigadeni.

Uuritava krohvisüsteemi (tõenäosus 95% kvantiili tasemel 75% usaldusnivool tagatud) elastsusmoodul oli $E=0,14$ GPa (Volkova et al., 2021). Korrutades temperatuurist ja niiskusest tekkivad deformatsioonid elastsusmooduliga, saame krohvi sees oleva pinge. See pinge peab olema väiksem kui katseliselt määratud krohvi pinge esimese prao tekkimise hetkel, mille väärtus on uuritava krohvisüsteemi puhul $\sigma_{pragu} = 2,58$ MPa (Volkova et al., 2021).

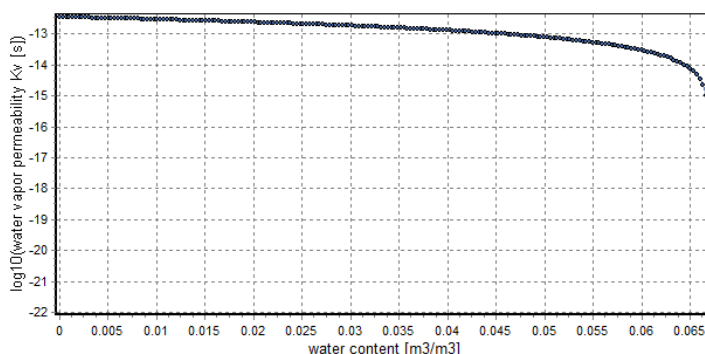
Seega pragude vältimise tugevustingimus näeb välja järgmine:

$$\sigma_{pragu} \geq \sigma_{tegelik} = E \cdot (\alpha \cdot \Delta T + \beta \cdot \Delta w)$$

3.2.2.2 Krohvisüsteemi veeaurujuhtivus

Krohvisüsteemi veeaurujuhtivus mõõdeti laboris (Volkova, 2021) poolt nädalase katse vältel nn kuiva ja niiske topsti meetodil vastavalt standardile (EVS-EN 1015-19, 2005). Mõõdetud krohvi (5mm paksune *StoArmierungsputz* + *StoSilco MP*) veeaurudifusioonitakistustegur niiskes keskkonnas (katsekeha keskmine RH=91%) oli $\mu = 37$ ning kuivas keskkonnas (katsekeha keskmine RH=27%) $\mu = 715$ (Volkova, 2021)

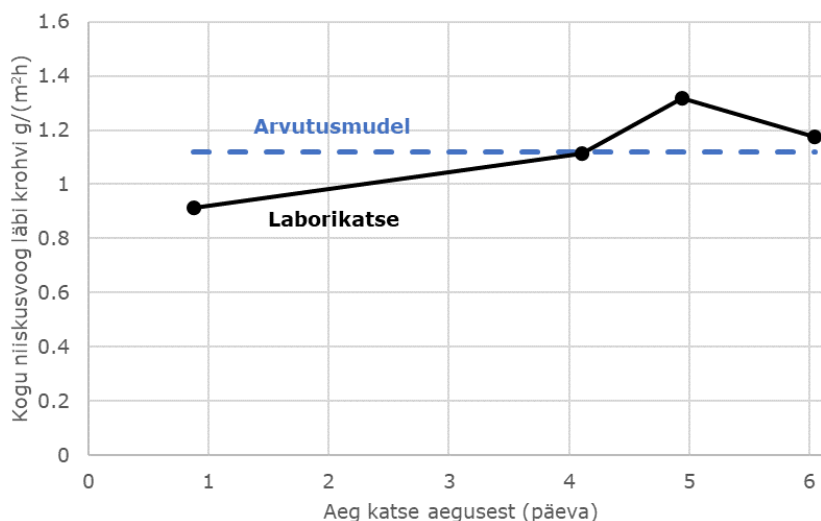
Delphini arvutusmudelites kasutamise jaoks on aga ühenumbriks väärtusest olulisem veeaurujuhtivuse funktsioon ning selle koostoime vedelikujuhtivuse funktsiooniga. Veeaurujuhtivuse funktsiooni $K_v(Thet)$ kalibreerimiseks võeti aluseks tüüpiline hüperboolne funktsioon *Delphini* materjalifailist nr 489 „*Barrier Plaster Sotana*“. See funktsioon kalibreeriti *Delphin 5* kalkulaatori abil ümber vastavalt kuiva topsti katse tulemusel leitud madalate niiskuste juures kehtivale difusioonitakistusteguri väärtusele $\mu = 715$ (Joonis 9).



Joonis 9. Kuiva topsti katse difusioonitakistusteguri järgi kalibreeritud *StoArmierungsputz* + *StoSilco MP* aurujuhtivuse funktsiooni graafik. Kuvatõmmis *Delphin 5* materjali omaduste visualiseerimise aknast.

Kuiva topsi tulemusi on edaspidi ära kasutatud vedelikujuhtivuse funktsiooni murdekoha defineerimisel ning funktsiooni kalibreerimisel vastavalt Delphini tarkvara loojate juhiste (Grunewald, 2018).

Krohvisüsteemi vedelikujuhtivuse funktsioon $KI(\Theta)$ defineeriti kolme punktiga nn „r-kujulise“ funktsioonina (Joonis 12), mille murdepunkt vastab kuiva topsi katsekeha keskmisele niiskussisaldusele $0,004 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Murdepunkti y-telje väärtuse leidmiseks simuleeriti Delphin 5 tarkvara abil märja topsi katse 5 mm paksuse krohviga katselabori ääritingimustel (temperatuur ja RH). Väljundina vaadeldi ühes tunnis ruutmeetrist krohvipinda läbiva niiskuse kogust grammides. Rahuldav korrelatsioon arvutusliku ning katseliselt mõõdetud veeauruläbivuse vahel (Joonis 10) õnnestus saavutada vedelikujuhtivuse graafiku murdekoha väärtuse $\log_{10}(KI) = -15,9575$ s korral. Seda väärtust on kasutatud vedelikujuhtivuse funktsiooni kõrgeima punkti dimensioneerimisel peatükis 3.2.2.3.



Joonis 10. Delphin 5 arvutusmodelis simuleeritud märja topsi katse ning laboris läbi viidud katse käigus mõõdetud niiskusevoog läbi krohvipinna. Arvutusmudeli graafik vastab vedelikujuhtivuse funktsiooni murdepunkti väärtusele (0,004; -15,9575).

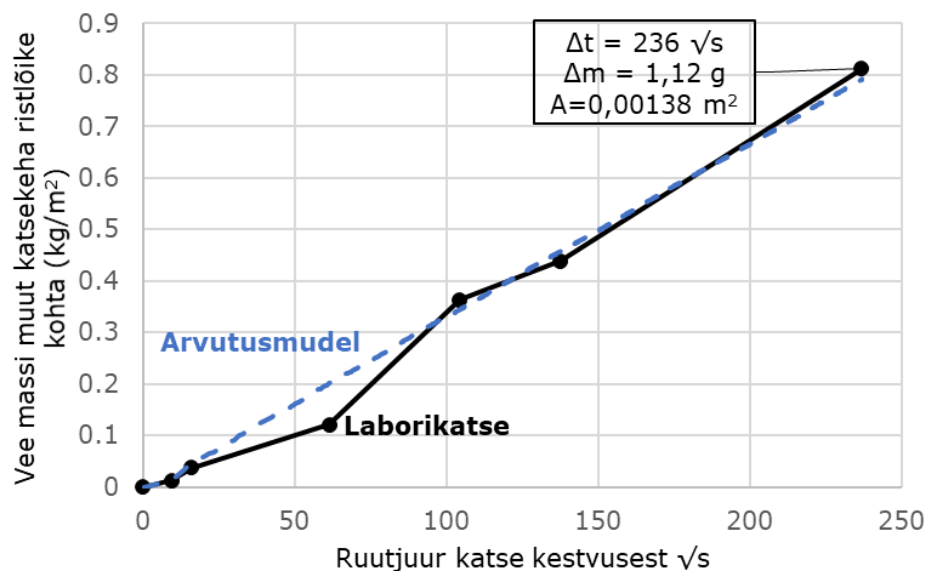
3.2.2.3 Krohvisüsteemi veejuhtivus

Krohvisüsteemi vedelikujuhtivus mõõdeti laboris vastavalt (EVS-EN ISO 15148, 2003) juhistele (Volkova, 2021). Samasugune katse ehitati üles ka Delphini arvutusmodelis. Samade mõõtmetega virtuaalne krohvitükk asetati serva pidi vette (water contact ääritingimus), sisestati katselabori RH ja temperatuur ning arvutusprogramm kalkuleeris krohvitüki summaarse vedelikusisalduse. Materjali vedelikujuhtivuse funktsioon $IgKI(\Theta_I)$ ning A_w ja K_{Leff} väärtused kalibreeriti lähendusprotsessi teel:

1. Eeldati lihtsustatud r-kujuline (Joonis 11) $IgKI(\Theta_I)$ kõver, mille kuju sarnaneb analoogsetele Delphini näidismaterjalidele;

2. Defineeriti peatükis 3.2.2.2 leitud funktsiooni murdepunkt koordinaatidega (0,004; -15,9575). Defineeriti graafiku haripunkti x-telje väärtus, mis vastab materjali poorsusele $0,067 \text{ m}^3/\text{m}^3$.
3. Võrreldi katsekeha vedelikusisaldusi samadel ajahetkedel arvutusmodeli vedelikusisaldustega. Eesmärgiks oli saada samasugune niiskumise kiiruse graafik;
4. Vajadusel muudeti $LgKI(Theta_I)$ graafiku viimase punkti y-koordinaadi väärtust.
5. Protsessi korraliti seni kuni saavutati korrelatsioon mõõdetulemuste ning arvutusmodeli väljundi vahel

Pärast mitut lähendusarvutust õnnestus saavutada korrelatsioon mõõdetud ning arvutatud vedelikusisalduste vahel (Joonis 11). Vajalikuks väljundiks oli materjalifaili $lgKI(Theta_I)$ funktsioon, millega korrelatsioon saavutati (Joonis 12).

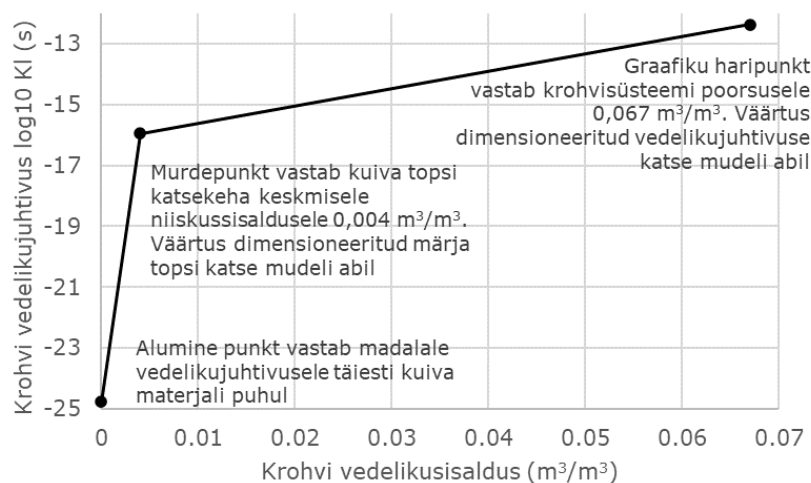


Joonis 11. 100x300x4,6 mm fassaadikrohvist katsekeha niiskussisalduse kasvamine ajas krohvi kapillaarjuhtivuse tõttu. Valitud vedelikujuhtivuse omadustega arvutusmodeli väljund korreleerub laboris läbi viidud vedelikujuhtivuse katsega.

Joonis 11 kujutatud vedelikujuhtivuse kiiruse iseloomustamiseks ühe parameetriga arvutati graafiku tõusu põhjal välja vedelikujuhtivuse koefitsient A_w (Water uptake coefficient) järgmiselt:

$$A_w = \frac{\Delta m_{\text{moisture}}}{A_{\text{contact}} \times \sqrt{\Delta t}} = \frac{1,12 \text{ g}}{1000 \text{ g} \times (0,0046 \times 0,3) \text{ m}^2 \times 236 \sqrt{s}} = 0,0034 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \sqrt{s}}$$

Katsetulemustele vastav arvutustulemus õnnestus saavutada Joonis 15 toodud vedelikujuhtivuse funktsiooniga.



Joonis 12. Fassaadikrohvi (StoArmierungsputz + StoSilco MP) vedelikujuhtivuse funktsioon arvutusmodelis kasutamiseks.

3.2.3 Faasimuutusmaterjal (PCM)

Faasimuutusmaterjalidena on kasutatud Rubithermi RT HC seeria materjale (Rubitherm, 2021). HC seeria eelis on suurendatud erisoojus sulamispiirkonnas, mis võimaldab väiksema materjalikogusega saavutada suurema energiamahutavuse sulamispiirkonnas. Faasimuutusmaterjali kapselduse tehnoloogiast sõltuvalt on loodud teiste materjalidega (krohv ning roostevaba teras) kaalutud keskmiste energiamahutavuse omadustega komposiitmaterjale.

3.2.3.1 PCMi soojusmahtuvuse funktsiooni lisamine Delphin 6 materjalidele

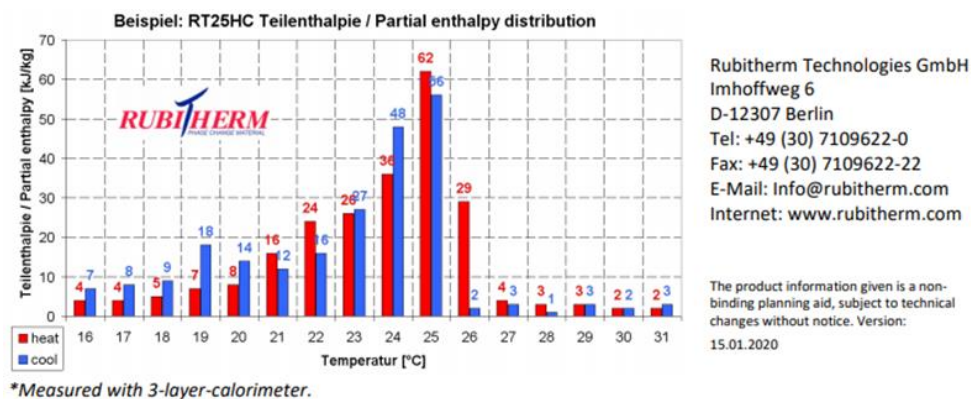
Käesoleva töö kirjutamise ajal võimaldas arvutustarkvara *Delphin 6* teostada faasimuutusmaterjalidega vaid soojuslikke arvutusi. Niiskuarvutuste teostamiseks oli vajalik abimudelite koostamine. Faasimuutusmaterjali omadusi on võimalik kirja panna materjali siseenergia funktsiooniga $u(T)$.

Funktsiooni sisestamiseks tuleb Delphin 6 materjali faili muuta ning lisada kaherealine funktsioon, mille ülemine rida defineerib absoluutsed temperatuurid (K) ning alumine rida defineerib igale temperatuurile vastava materjali siseenergia hulga ühe kuupmeetri kohta (J/m^3). Viimase saamiseks on vaja faasimuutuse välises piirkonnas korrutada omavahel materjali erisoojus c ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$), absoluutne temperatuur T (K) ja tihedus ρ (kg/m^3). Faasimuutuse piirkonnas on vaja vastavalt materjali tootja antud graafikule liita eelmise temperatuuripunkti siseenergiale lisanduv siseenergia muut ja korrutada see tihedusega.

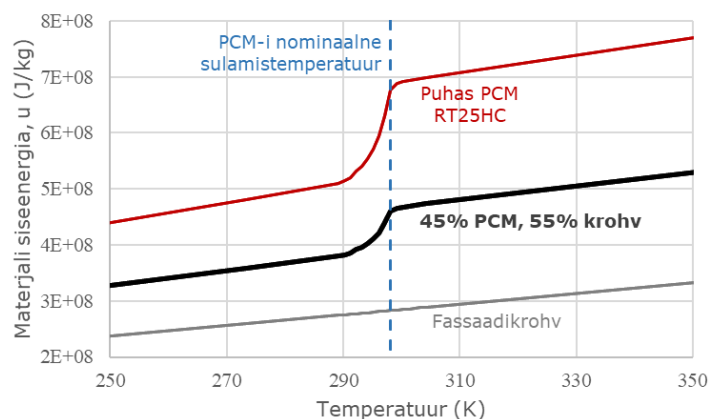
```
[THERMAL_STORAGE]
FUNCTION = u(T)
0 273.15 289.15 290.15 291.15 292.15 293.15 294.15 295.15 296.15
0 480744000 508904000 514184000 520344000 531344000 541024000
```

Joonis 13. Faasimuutusfunktsiooni näidis. Kuvatõmmis Delphin 6 materjalifailist.

Tähelepanu tuleb pöörata sellele, et vedela ja tahke materjali tihedused on reeglina erinevad. Käesolevas töös on kasutatud materjali nominaalsest sulamistemperatuurist kõrgemate temperatuuride juures vedela materjali tihedust, madalamatel temperatuuridel tahke materjali tihedust. Tähele tasub panna ka seda, et materjali tootja annab sulamisprotsessiks ja tahkumisprotsessiks erinevad graafikut. *Delphini* jaoks on vaja aga ühtset funktsiooni. Käesolevas töös on sulamis- ja tahkumisenergiad igal temperatuuril keskmistatud.



Joonis 14. Faasimuutusmaterjali sulamissoojuste graafiku näidis. Kuvatõmmis tootja kodulehelt. (RT25HC Data Sheet, 2021)



Joonis 15. Faasimuutusmaterjali sulamise ja tahkumise protsessi keskmine siseenergia graafik *Delphini* mudeli jaoks sobivate ühikutega (must). Funktsioon on saadud puhta faasimuutusmaterjali (punane) ja fassaadikrohvi (hall) kaalutud keskmistamisel vahekorras 45% PCM ja 55% krohv.

3.2.4 Metallkesta sisse kapseldatud faasimuutusmaterjal

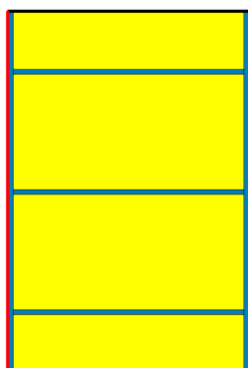
Roostevabast terasest kapsli sisse kapseldatud PCM lahenduse omaduste määramiseks kombineeriti terase ja faasimuutusmaterjali omadusi. Kuna metallist kest on oma

olemuselt veeauru mitte läbilaskev ning ei juhi ka vedelikku, siis on selle lahenduse puhul vaja defineerida vaid soojuslikud omadused. Niiskuslevi omadused on asendatud suure veeauru takistuse ääretingimusega ($S_d=10\ 000\text{m}$).

3.2.4.1 Roostevabast terasest kesta PCM-i soojuserijuhtivus

Kuna faasimuutusmaterjal ise on halb soojusjuht, siis on teraskesta sees ette nähtud täiendavad jäikusribid, mis lisaks konstruktsiooni tugevdamisele juhivad ka soojust kesta päikese poolt küljelt soojustuse poolse küljeni. Nende ribide arvutuslikuks paksuseks valiti 1mm ning sammuks 25mm. Sellise materjali (kesta paksus 40mm) keskmine soojuserijuhtivus arvutati kahemõõtmelise temperatuuriväljatarkvaraga ning saadi tulemuseks $1,6\text{ W/(mK)}$ (Vt Lisa 3 ja

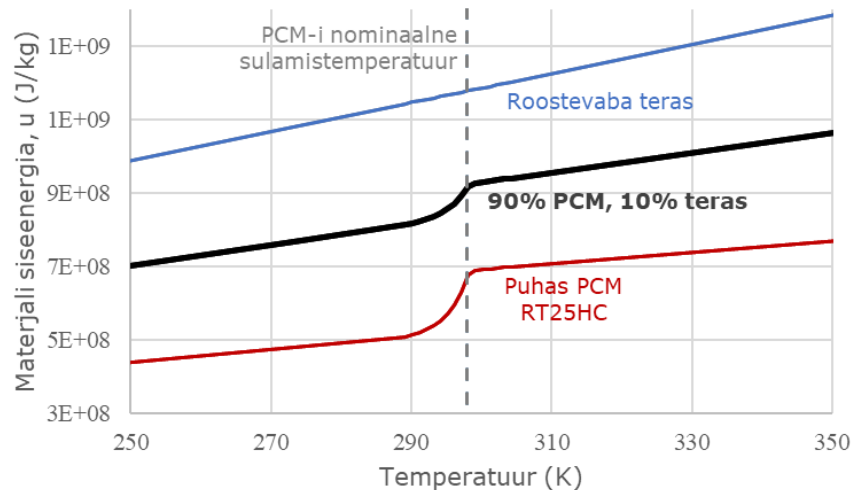
Joonis 16).



Joonis 16. Jäikusribidega roostevabast terasest kesta sisse makrokapseldatud PCM-i soojuserijuhtivuse leidmise mudel Therm 7.7 tarkvaras

3.2.4.2 Roostevabast terasest kesta PCM-i siseenergia

Materjali kombineeritud siseenergia funktsiooni $u(T)$ arvutamise jaoks lähtuti ristlõike pindalade suhtest. Arvestades ka kesta servades oleva terasega tuleb materjalide mahuprotsendiline suhe 10% terast ning 90% PCM. Arvutades selle ümber massiprotsentideks tuleb terase ja PCM suhe 52% terast ja 48% faasimuutusmaterjali.



Joonis 17. Faasimuutusmaterjali sulamise ja tahkumise protsessi keskmine siseenergia graafik Delphini mudeli jaoks. Funktsioon on saadud puhta PCM-i ning roostevaba terase kombineerimisel ristlõike mahuprotsendilise suhtega 90:10. See vastab massiprotsendilisele suhtele 48:52.

3.2.5 Krohvi sisse kapseldatud faasimuutusmaterjal

Fassaadikrohvi sisse kapseldatud PCM lahenduse omaduste määramiseks kombineeriti erinevate materjalide omadusi. Kuna see mittehomoogeenne materjalikiht on sedavõrd uudne, olid selle täpsed ehitusfüüsikalised omadused magistritöö tegemise ajal veel teadmata. Seetõttu on mõned kasutatud omadused tuletatud tavalise tsemendibaasilise krohvi omaduste kaudu ning vajavad tulevikus kindlasti täpsemat mõõtmist.

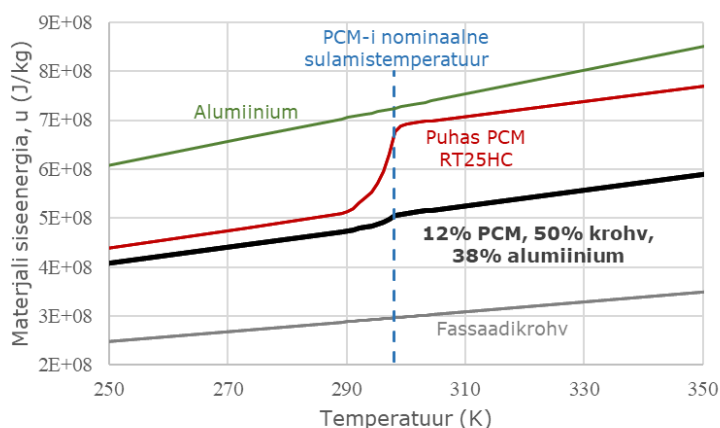
Mikrokapseldamise lahendus põhineb faasimuutusmaterjali segamisel alumiiniumipulbriga. Alumiiniumipulbri näol on tegemist metallitööstuse tootmisjäätisega, mida energiaaktiveeritud SILS fassaadides oleks võimalik taaskasutada. Alumiiniumi ja sulanud faasimuutusmaterjali segu vormitakse tsentrifuugimise meetodil graanuliteks, mis seejärel kaetakse polüuretaanvaiguga, tagamaks graanulite lekkekindluse. Valmis graanulid segatakse seejärel krohvi sisse. Krohvi ja graanulite segu paigaldatakse raabitsvõrguga armeerides 30...40mm paksuse krohvikihina tüübeldatud soojustuse peale ning selle peale liimitakse PV paneel.

3.2.5.1 PCM-krohvi energiamahuvuse funktsioon

Esialgsete mõõtmisandmete põhjal võiks piisavate mehaaniliste omadustega püsiva komposiitmaterjali anda segu, mille massiprotsendiline koostis võiks olla järgmine:

- 50% fassaadikrohv
- 38% alumiinium
- 12% faasimuutusmaterjal

Nende osakaalude põhjal koostati materjalile kaalutud keskmine siseenergia funktsioon (Joonis 18).



Joonis 18. PCM krohvi siseenergia funktsiooni loomine kolme materjali siseenergia funktsiooni kaalutud keskmistamise teel

3.2.5.2 PCM-krohvi tihedus ja poorsus

Võttes arvesse koostismaterjalide tihedused (vt Lisa 3), saab leida komposiitmaterjali tahke osise mahuprotsendilise koostise:

- 56% fassaadikrohv
- 22% alumiinium
- 22% faasimuutusmaterjal

PCM krohvi kohta olid töö kirjutamise ajal teada ühe katsekeha mõõtmed (185 x 145 x 40 mm) ning kuivmass ($m = 1417$ g). Seega on mõõtmete ja kuivmassi ning tahke osise koostise abil võimalik ligikaudselt hinnata katsekeha tihedust ja poorsust.

Katsekeha tiheduse saab leida ruumala ning kuivmassi järgi:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1,417 \text{ kg}}{0,001073 \text{ m}^3} = 1321 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Poorsus on võimalik leida, vähendades tahke osa ruumala seni kuni koostismaterjalide mass annab kokku kogu katsekeha massi. Arvutuskäik ja tulemus on toodud Tabel 1.

Tabel 1. PCM krohvi poorsuse arvutamine mahuprotsendilise koostise ning mõõdetud kuivmassi ja ruumala järgi.

<i>Koostis- materjal</i>	<i>Tihedus (kg/m³)</i>	<i>Mahu- prot- sent</i>	<i>Tahke osa ruumala (m³)</i>	<i>Koostis- materjali ruumala (m³)</i>	<i>Materjali mass (kg)</i>	<i>Mõõdetud katsekeha ruumala (m³)</i>	<i>Poorsus (m³/m³)</i>
Krohv	1365	56%	0,000921	0,0005158	0,704	0,001073	0,14
Alumiinium	2700	22%		0,0002026	0,547		
PCM	820	22%		0,0002026	0,166		
Summa				0,0009210	1,417		

Seega saab pooridega arvestades komposiitmaterjali kirjeldada mahuprotsendiliselt järgmiselt:

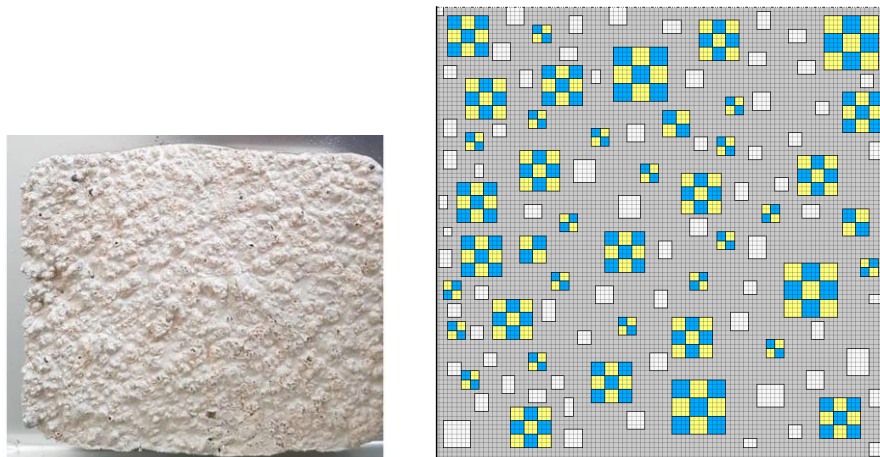
- 48% fassaadikrohv
- 19% alumiinium
- 19% faasimuutusmaterjal
- 14% poriõhk

3.2.5.3 PCM-krohvi soojuserijuhtivus

Mittehomogeense materjali soojusläbivuse leidmiseks lihtsustati graanulilise materjali ristlõike riskülikuteks (Joonis 19), jagades materjalide kogused ristlõikes ligilähedaselt nende mahulise koostise järgi ära. Tulemuseks oli kuiva komposiitmaterjali soojuserijuhtivus $\lambda_{dry}=0.78 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, mis on üsna sarnane fassaadikrohvi soojuserijuhtivusega [$\lambda_{dry}=0.70 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$], mille sisse teised koostisosad kapseldatud on. Oluline on ka ära märkida, et reaalsuses on tegemist 3D olukorraga, kuid eelmainitud tulemus on arvutatud 2D olukorra jaoks. Tulevikus on täpsemate arvutuste tegemiseks vajalik PCM krohvi soojuserijuhtivus laboris katseliselt määrata.

Asendades arvutusmudelis kõik õhupoorid veega [$\lambda=0.57 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] ning kasutades iga materjali puhul nende soojuserijuhtivuse väärtusi 100%RH juures, saadi täiesti märja krohvi soojuserijuhtivuseks $\lambda_{wet}=0.96 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Arvestades asjaolu et tõenäoliselt on

mõned poorid ka materjali läbivad, tuleks arvestada ka vedeliku mikrokonvektsiooniga, mis muudaks soojuseri juhtivuse mõnevõrra suuremaks. Soojusarvutuste puhul toimib PCM krohv seda efektiivsemalt, mida suurem on soojuseri juhtivus. Seega arvutustes kasutame tagavara kasuks numbrit $\lambda_{dry}=0.78 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.



Joonis 19. PCM krohvi katsekehade pindmise kihi foto (vasakul) ning Delphin 6 tarkvaras loodud soojusarvutuse mudel PCM krohvisüsteemi soojusjuhtivuse leidmiseks (paremal). Arvutuslik kihi paksus on 40mm. Kollasega on kujutatud PCM [$\lambda=1,13 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$], sinisega alumiinium [$\lambda=235 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$], valgega õhupoorid [$\lambda=0,045 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$] ning halliga fassaadikrohv [$\lambda=0,7 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$]. Komposiitmaterjali keskmine soojuseri juhtivus oli $0,78 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

3.2.5.4 PCM-krohvi auru- ja vedelikujuhtivus

Kui algselt oli plaanis kapseldada PCM graanulid Tehnikaülikoolis mõõdetud (Volkova, 2021) orgaaniliste fassaadikrohvide sisse, siis töö käigus selgus, et õhekrohvisüsteemi ei ole võimalik nii paksus kihis paigaldada. Seetõttu valiti PCM graanulite kapseldamiseks mineraalne krohv (Sto Faserputz, 2018).

Komposiitmaterjali niiskustlike omaduste täpsustamisel lähtuti sellest et niiskustlikud omadused dikteerib ennekõike krohv. Kuna erinevalt orgaanilistest krohvidest eksisteerib Delphini andmebaasis mitmeid mineraalseid krohve, võeti aluseks materjal nr 242 – *Surface coating plaster*. Seda materjali muudeti vastavalt teada olevatele omadustele. Omadusi mõjutab ennekõike asjaolu, et graanulite pind on veetihe, mistõttu osa materjali mahust ei võta enda sisse vett.

Lodži Tehnikaülikooli mõõtmistulemuste põhjal on teada et PCM krohvi poorsus on $0,14 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Vastavalt sellele korrigeeriti krohvi sorptsioonkõverat *Delphin 5* kalkulaatori abil.

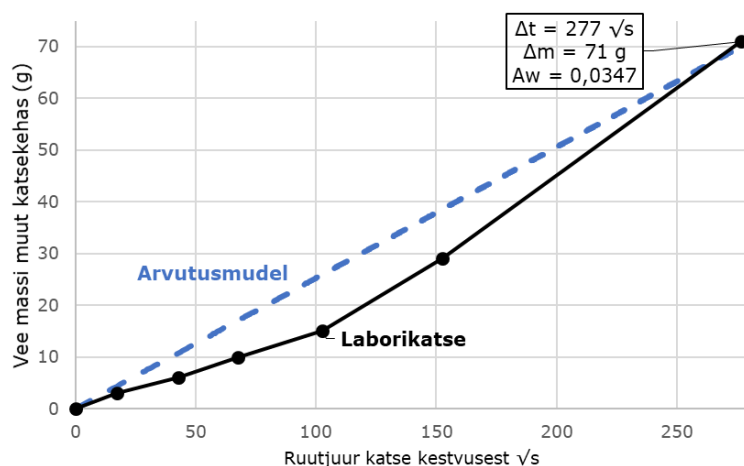
Krohvi tootja deklareerib krohvi veeauru difusioonitakistusteguriks $\mu=27$ (Sto Faserputz, 2018). Arvestades asjaoluga et komposiitmaterjal koosneb 38% mahuprotsendi ulatuses veetihedatest PCM graanulitest, mis auru liikumist takistavad, suurendati difusioonitakistustegurit 1,38 korda ning saadi $\mu=37$. Vastavalt sellele korregeeriti veeaurujuhtivuse funktsiooni.

PCM krohvi vedelikujuhtivuse funktsiooni kalibreerimiseks on olemas PCM krohvi veejuhtivuse katse tulemused, mis on läbiviidud Poolas, Lodzi Tehnikaülikoolis 185 x 145 x 40 mm katsekehaga. Katsekeha veega kontaktis oleva ristlõike mõõt oli seejuures 185 x 40 mm.

Vedelikujuhtivuse katsest on võimalik leida PCM krohvi vedelikujuhtivuse koefitsient:

$$Aw = \frac{\Delta m_{moisture}}{A_{contact} \times \sqrt{\Delta t}} = \frac{71g}{1000g \times (0,04 \times 0,185)m^2 \times 277\sqrt{s}} = 0,0347 \frac{kg}{m^2\sqrt{s}}$$

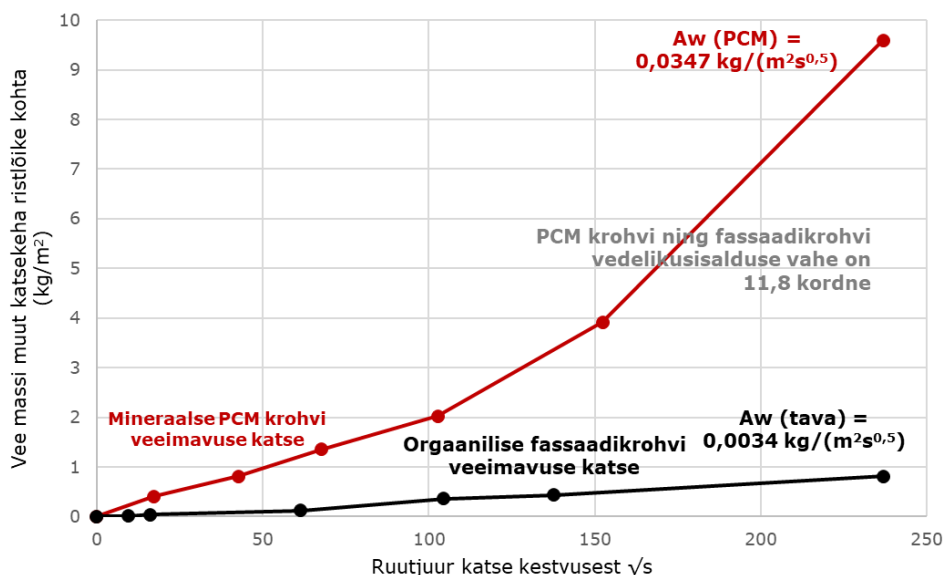
Vedelikujuhtivuse katset jälgendati *Delphin 5* arvutusmudeliga sarnaselt tavalise fassaadikrohviga tehtud katsele. $Kl(Thetal)$ funktsiooni nihutamise abil saadi kalibreeritud materjalifail, millega laborikatset jälgendades õnnestus saada sarnane proovikeha niiskussisalduse kasv (Joonis 20).



Joonis 20. Serva pidi vette asetatud 185x145x40mm PCM graanulitega segatud fassaadikrohvist katsekeha niiskussisalduse kasvamine ajas ning võrdlus sama eksperimenti jälgendava arvutusmodeli tulemustega.

Krohvi sisse kapseldatud PCM graanulitega energiaaktiveeritud SILS fassaadi lahenduse puhul töötavad kõrvuti orgaaniline, 5mm paksune fassaadikrohv ning 30...40mm paksune graanulitega segatud mineraalne krohv. Selleks et võrrelda kahe erineva suurusega, eri materjalidest tehtud katsekehade vedelikujuhtivuse katse tulemusi, arvutati mõlema katse

jaoks välja vedelikusisalduse kasvamise funktsioonid. Kahte funktsiooni võrreldes on näha, et vedelikusisalduste vahe on kogu katse vältel püsivalt ca 8...12 kordne. Ka A_w erinevus on 10 kordne. See näitab veelkord, kui erinevad on mineraalsed ning orgaanilised krohvid ning kuivõrd oluline on konkreetse ehitusmaterjali omadusi õigesti mõõta ja hinnata.



Joonis 21. Orgaanilise fassaadikrohvi süsteemi ning mineraalse PCM krohvi vedelikusisalduse kasvamise funktsioonide võrdlus vedelikujuhtivuse katsetulemuste alusel.

3.2.6 Kandekonstruksiooni materjalid

Betoonist kandva seina osa mudeldamiseks on kasutatud *Delphini* materjali nr 411; *Concrete B25*. Ühtegi omadust muudetud ei ole. Niiskuservutustes on kohati kasutatud betooni algniiskust $0,11 m^3/m^3$, mis vastab üsna hästi uusehitise betooni niiskusele ning renoveeritava hoone välimise raudbetoonkooriku maksimaalsele niiskussisaldusele (Pihelo, 2020)

Poorbetoonist kandva seina osa mudeldamiseks on kasutatud *Delphini* materjali nr 1; *Autoclaved Aerated Concrete*.

3.2.7 Liimsegu

Lähtematerjalina on kasutatud *Delphini* materjali nr 90; *Glue Mortar I*. Materjali omadusi on korrigeeritud vastavalt *Weber*-i EPS liimsegu *Webertherm 305* omadustele (*Webertherm 305*, 2021). Vastavalt tootja andmetele on korrigeeritud soojuseri juhtivus λ ($0,19 \rightarrow 0,21 W/mK$) ja difusioonitakistustegur μ ($15 \rightarrow 25$).

3.2.8 Soojustusmaterjalid

Töös on soojustusmaterjalidena kasutatud EPS Silverit, Mineraalvilla, fenool soojustusplaati ning *Linirec* soojustusplaati. Nende materjalide kasutatud omadused on näha Lisas 3.

Fenool soojustusplaadina on kasutatud Delphini materjali 689, mille omadused on defineeritud *Kingspan* poolt ning langevad kokku *Kingspan Kooltherm K5* krohvitava fassaadisoojustuse omadustega (Kingspan, 2019).

Linirec soojustusplaadiga on teostatud ainult soojuslikke arvutusi. Seetõttu on defineeritud vaid soojuslikud omadused vastavalt materjali tootelehele (Linzmeier, 2020).

EPS Silveri lähtematerjaline on kasutatud Delphini materjali nr 186; *Polystyrene Foam Board*. Materjali omadusi on korrigeeritud vastavalt ESTPlasti EPS60 Silver omadustele (ESTplast, 2021). Muudetud on soojuserijuhtivus λ_{dry} (0,040→0,032 W/mK) ja difusioonitakistustegur μ (50→30).

Erinevate kinnituslahenduste võrdluses on kasutatud niiskema EPS-i soojuserijuhtivus ($\lambda=0,034$ W/mK), mis vastab niiskustlike arvutuste tulemustena saadud 93% RH (aasta keskmine) juures oleva EPS-i niiskusele.

3.3 Kliima ääretingimuste valik

Käesolevas töös on analüüsitud SILS tarindi niiskustehnilist toimimist viies erinevas Euroopa väliskliimas. Niiskuservutustes kasutatavad testaastad on valitud eesmärgiga panna tarind tagavara kasuks pigem niiskemasse mineviku kliimas esinevasse olukorda.

1. Väike-Maarja, Eesti. Kondensaadiohu testaasta, 1995-1996. Kiirgusena on kasutatud Tõravere andmeid.
2. Bergen, Norra. Niiskuservutuse testaasta, 1991.
3. Trondheim, Norra. Niiskuservutuse testaasta, 1971.
4. Potsdam, Saksamaa. Niiskuservutuse testaasta, 2010.
5. Vantaa, Soome. Niiskuservutuse testaasta, 2007.

Soojuservutuste jaoks need testaastad aga disainitud ei ole. Päikeseenergeetikas kasutatakse sageli tüüpilisi meteoroloogilisi testaastaid (TMY – *Typical Meteorological Year*), kus kombineeritakse kokku iga kuu kõige tüüpilisem kliima antud juhul 14 aastase

perioodi vältel. Kasutatud testaastad on vabalt kättesaadavad internetist (Climate.OneBuilding.Org, 2019) ning konverteeritud töö autori poolt *Delphini* jaoks sobivasse vormi. Faasimuutusmaterjalide valiku ja dimensioneerimise arvutustes on kasutatud järgmisi testaastaid:

6. Tallinn, Eesti. Tüüpiline Meteoroloogiline Aasta (TMY), 2004-2018
7. Lodz, Poola. Tüüpiline Meteoroloogiline Aasta (TMY), 2004-2018
8. Madrid, Hispaania. Tüüpiline Meteoroloogiline Aasta (TMY), 2004-2018

Väliskliima andmetest on kasutusel:

- 1) Välisõhu temperatuur ($^{\circ}\text{C}$)
- 2) Päikese otsene lühilainekiirgus (W/m^2) (kiirgus horisontaalpinnale)
- 3) Hajuskiirgus (W/m^2)
- 4) Välisõhu suhteline niiskus ($\% \text{ RH}$)
- 5) Fassaadile langeva kaldvihma koormus ($\text{l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$), mille arvutamisel on kasutatud (arvutusvalem toodud Lisas 1):
 - a. Sademed horisontaalpinnale ($\text{l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)
 - b. Tuule kiirus (m/s)
 - c. Tuule suund, asimuut ($^{\circ}$)
 - d. Maastiku iseloomule ja arvutuspunkti asukohale fassaadil vastavad arvutuskonstandid on toodud Lisas 1.

Sisekliimana on kasutatud Eesti kondensaadi testaastale vastavat sisekliimat, niiskulisaga $6\text{g}/\text{m}^3$, mis vastab elamu netopinnale 14m^2 ühe inimese kohta keskmise niiskulisana ja $30\text{ m}^2/\text{in}$ kohta 90% usaldusnivool kriitilise niiskulisana (Ilomets et al., 2018) (Ilomets, 2017). Eestis teostatud niiskuslisa mõõtmise tulemused korreleeruvad suhteliselt hästi ka teiste Põhja-Euroopa ja Kanada mõõtmistulemustega (Ilomets et al., 2019), mistõttu on nende kasutamine ka teistes käesolevas töös uuritavate kliimade puhul põhjendatud.

Vaid Madridi sisekliima puhul on tehtud üks mööndus võrreldes Põhja-Euroopa sisekliima loomise metoodikaga. Nimelt kasutatakse Vahemere piirkonna elamutes laialdaselt jahutusseadmeid, mistõttu on ka eluhoonete sisetemperatuur piiratud +25°C-ga. Soojemate tingimuste puhul on eeldatud jahutusseadme sekkumist.

Kuna käesolevas töös kirjeldatud fassaadilahendus peab olema päikesekiirgusele avatud ning kõik arvutatavad linnad asuvad põhjapoolkeral, siis eeldati et sein asub lõunakaares (st asimuut 90°...270°). PV paneelide ülekuumenemisega seotud arvutusi teostati täpselt lõunasse suunatud seina jaoks (asimuut 180°) ja niiskusturvalisuse analüüsi teostati igas asukohas kõige kriitilisema põhi- või vaheilmakaare jaoks (vt Tabel 2). Kirjanduse andmetel on SILS fassaadide ehitamine soovitatav, kui aastane kaldvihma koormus on alla 400 l/m² aastas, SILS võib olla ebaturvaline vahemikus 400-600 l/m² aastas ning koormusega üle 600 l/m² aastas peaks olema SILS ehitamine keelatud (Kvande et al., 2018).

Tabel 2. Iga niiskuservutuse asukoha jaoks kriitiliste ilmakaarte valik. Analüüsil on kasutatud niiskuservutuse testaastaid. Sinisega on märgitud kaldvihma suhtes kõige kriitilisemad seina suunad.

Asukoht	Testaasta summaarne kaldvihmakoormus (l/m²)					Arvutustes kontrollitav kriitiline fassaadi suund
	Läänest (270°)	Edelast (225°)	Lõunast (180°)	Kirdest (135°)	Idast (90°)	
Väike-Maarja	60	80	72	46	33	Edel 225°
Bergen	137	295	559	547	225	Lõuna 180°
Trondheim	258	247	124	32	18	Lääs 270°
Potsdam	91	96	60	30	23	Edel 225°
Vantaa	70	156	202	148	68	Lõuna 180°
	Testaasta keskmine kaldvihmategur					
	Läänest (270°)	Edelast (225°)	Lõunast (180°)	Kirdest (135°)	Idast (90°)	
Väike-Maarja	0,109	0,146	0,132	0,085	0,061	Edel 225°
Bergen	0,057	0,122	0,232	0,227	0,106	Lõuna 180°
Trondheim	0,212	0,203	0,102	0,026	0,015	Lääs 270°
Potsdam	0,193	0,205	0,128	0,063	0,049	Edel 225°
Vantaa	0,093	0,207	0,268	0,196	0,090	Lõuna 180°

3.3.1 Välispinnatakistuse soojustakistuse määramine

Kuna antud töö soojuservutuse osa puhul on äärmiselt oluline mudeldada õigesti PV paneelide pinnatemperatuurid, siis osutus vajalikuks täpsustada pinnatakistusi. Standardikohane niiskuservutustes kasutatav väärtus $R_{se}=0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ on mõeldud niiskuservutuste teostamiseks ning on tagavara kasuks. See väärtus jahutab välispinda reaalsest olukorrast oluliselt rohkem, kuna niiskustehnilise kontrollarvutuse seisukohast on ohtlikud pigem jahedamad pinnatemperatuurid.

Reaalsed pinnatakistuse väärtused sõltuvad tuulest, mille saab kliimaandmetest. Antud töös on kasutatud töödeldud tuule andmed, kus on arvesse võetud vaid uuritava ilmakaare suhtes $\pm 90^\circ$ suhtes puhuvad tuuled. Ehk siis näiteks lõunafassaadi uurides (asimuut 180°) on mõõdetud tuule kiirusega arvesse võetud tuuled, mis puhuvad vahemikus asimuut 90° kuni 270° . Põhjakaarte tuuled on võetud võrdseks nulliga.

Arvestades tuule mõju, on vaja defineerida mitmed arvutuskonstandid. *Delphinis* on võimalik kasutada välispinna takistuse konvektiivse komponendi arvutamiseks valemit, mille konstantide väärtus on vastavalt standardile (EVS-EN 15026:2007) järgmine:

$$h_{ce} = 4 + 4v$$

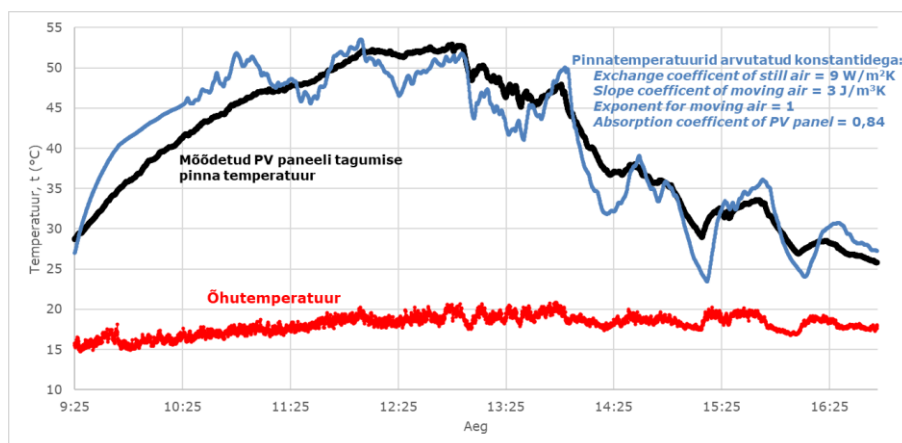
Kus v on tuule kiirus (m/s). Juhul kui pika lainepikkusega kiirgust mitte kasutada, siis tuleb vastavalt võtta seisva õhu pinnajuhtivus (Exchange coefficient for still air) võrdseks $9 \text{ W/m}^2\text{K}$. Sel juhul omandab valem kuju:

$$h_{ce} = 9 + 4v$$

Kontrollimaks standardi kohase valemi sobivust ka meie arvutusolukorras, viidi läbi 6. oktoobril 2020. aastal Poolas, Lodzis 7-tunnine katse, kus 50mm paksune EPS soojustus krohviti ning selle külge liimiti 2mm paksune PV paneel. Katsekeha asus suunaga 188° . Mõõdeti paneelile langevat päikesekiirgust, välisõhu temperatuuri, tuule suunda ja kiirgust ning PV paneeli tagumise külje temperatuuri. Teada oli PV paneeli neelduvustegur 0,84.

Eksperimentaalseid väärtuseid prooviti jäljendada Delphini arvutusmodeliga, proovimise teel standardijärgseid konstantide väärtusi muutes (vt Joonis 22). Kõige parem korrelatsioon õnnestus saavutada olukorras kus seisva õhu pinnajuhtivus oli $9 \text{ W/m}^2\text{K}$, kuid liikuva õhu korral oli pinnatakistuse saamiseks vajalik arvutustegur $3 \text{ J/m}^3\text{K}$. Ehk valem omandab kuju:

$$h_{ce} = 9 + 3v$$



Joonis 22. Lodzis läbi viidud katses mõõdetud (must joon) ning Delphin 6 mudeliga arvutatud (sinine joon) parima korrelatsiooniga PV tagumise pinna temperatuuride võrdlus. Mudelisse sisestatud konstandid on kirjas joonisel.

3.3.2 Kaldvihma koormuse määramine

Kogu fassaadipinnale sattuva kaldvihma koormuse arvutame tuule tugevust, suunda ja sademete kogust arvestades vastavalt standardile (EVS-EN ISO 15927-3:2009). Kasutatavad arvutusvalemid ja valitud konstandid on toodud Lisas 1. Kuna kogu fassaadile langev kaldvihm ei imendu krohvi sisse, vaid osa (ca 30%) sademetest põrkub kohe seinalt tagasi ja langeb maapinnale, siis soovitatakse täiendavalt kasutada kaldvihma koormuse vähenduskoeffitsienti 0,7 (prEN 15026:200620, 2020).

Lisaks kogu fassaadile sadavale kaldvihma koormusele on oluline eeldada ka seda, et fassaadikrohv ei ole täiesti pragude vaba. Läbi pragude krohvi taha jõudva kaldvihma koormuse suuruse määramine on antud töö kontekstis üks olulisemaid niiskuskoormuseid.

Rootsis tehtud laboratoorsed uuringud on näidanud, et väikesed, silmaga nähtamatud lekkekohad võivad tugeva kaldvihma korral konstruktsiooni sisse juhtida kuni 2% fassaadipinnale rakendunud kaldvihma koormusest. (Olsson, 2017)

Uuringus katsetati erinevate mõõtudega defekte nagu näiteks avasid 2 x 2 mm ning 0,9 x 35mm. Kasutati erinevaid kaldvihma koormuseid ja erinevat tuulerõhku. Selgus et suurendades fassaadile pritsiva vee kogust 2 korda, suurenes fassaadi läbiva kaldvihma kogus vähem kui 2 korda. (Olsson, 2017)

Kui suuremate pragude ja defektide korral määras lekkiva vee koguse tuulerõhk, millega vihm vastu fassaadi sadas, siis peenemate pragude puhul ei sõltunud pragu läbiva vee hulk eriti rõhust. Näiteks SILS süsteemi puhul suhteliselt tavaliste pragude puhul suurusega 0,3 x 3 mm ja 0,4 x 4 mm oli pragu läbiva vee kogus 0,015 l/min (kaldvihma koormusel 2,9 l/min), mis teeb fassaadi läbiva vee hulgaks 0,5%. (Olsson, 2017)

Kõige rohkem veelekkeid läbi fassaadi toimub akende sõlmedes. Rootsi uuringust selgus, et ka tehniliselt kõige korrektsemalt teostatud ja hoolikalt tihendatud liitekohad suure tõenäosusega siiski lekivad ning selle täiendava niiskuskoormusega on vaja arvestada. 2D analüüsi puhul on soovitatav tagavara kasuks arvutades asetada kogu lekkiva vee hulk kas ühte kõige kriitilisemasse punkti või reaalse liitekohale asukohale vastavasse punkti. (Olsson, 2017)

Käesoleva töö eesmärk on paigaldada kõrvuti PV paneeliga energiaaktiveeritud soojusisolatsiooni liitsüsteem ning tavaline SILS. Kahe erineva materjali liitekoht sarnaneb mõneti akna ja seina liitekohale. Seetõttu on oluline hoolikalt lahendada just PV paneeli ja

tavalise krohvitud seina liitekoht. Siiski ei pruugi see olla kogu ehitise eluea jooksul ideaalselt veetihe.

Eelnevast lähtudes võiks võtta fassaadi läbiva vee koguseks väikese tagavara kasuks 1%. Samasugune number on välja toodud ka USA standardis (ASHRAE 160P, 2008; TenWolde, 2008). 1% kaldvihma koormuse kasutamise eelduseks on see, et tegemist on korrektselt tihendatud sõlmedega, PV paneeli ja krohvi liitekohtade nurkadesse on paigaldatud korrektne 45° võrra pööratud armeerimisvõrk ning deformatsiooniprofiilid on paigaldatud kogu fassaadile vastavalt prao tekke sammu arvutusele.

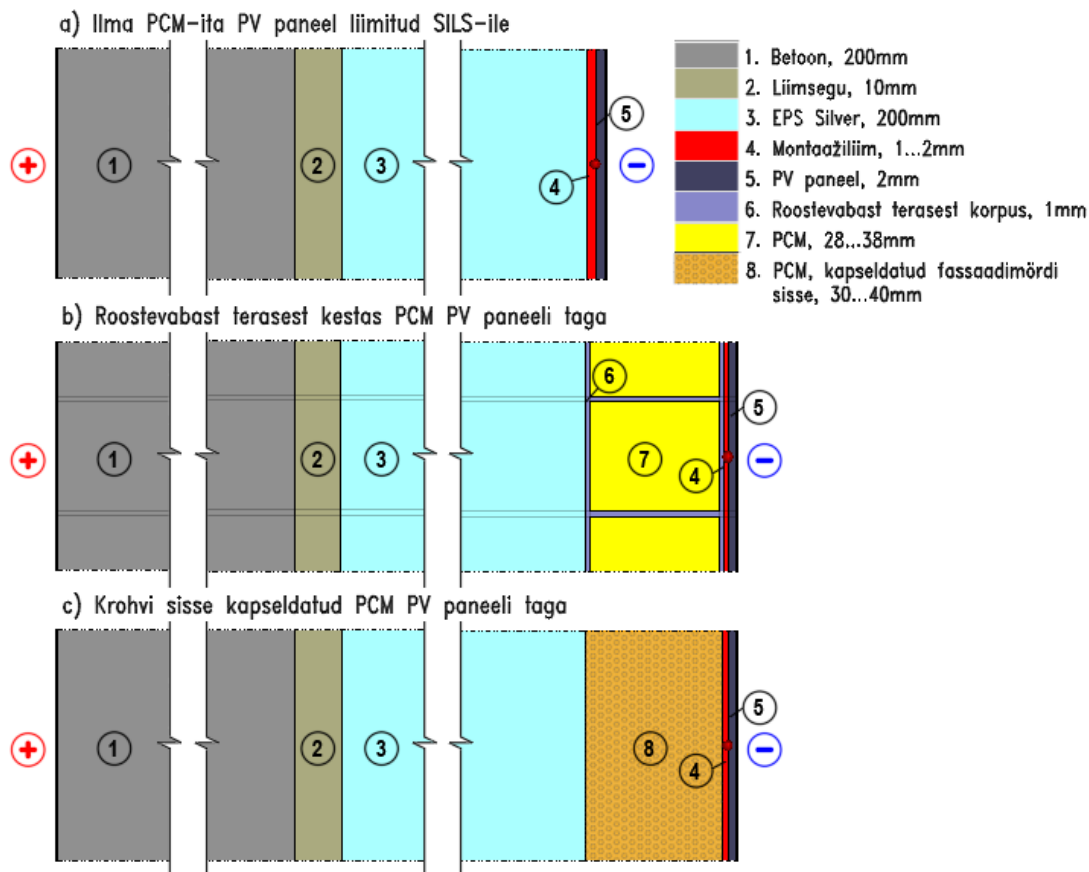
Eestis on ka varasemalt läbi viidud SILS tarindi arvutuslikku modelleerimist, arvestades krohvisüsteemi läbivaks kaldvihma koormuseks 1% fassaadile langevast kaldvihmast ning need arvutustulemused on anduritega mõõdetud päris seina niiskustasemetega suhteliselt hästi kokku langenud. (Ilomets, 2017)

3.4 Arvutusmodelite ülesehitus

Järgnevalt on ära toodud peamised töös kasutatud *Delphini* arvutusmodelid ning nende ülesehitamise põhimõtted.

3.4.1 1D ja 2D Soojusarvutuse modelid PCM-i dimensioneerimiseks ja PV efektiivsuse arvutuseks

Esimeseks modeliks oli faasimuutusmaterjali funktsiooni sisaldava materjalikihiga soojusliku arvutuse mudel. Töö käigus kasutati 1D mudelit, kus fassaadikrohvi sisse oli segatud mikrokapseldatud faasimuutusmaterjal (Joonis 23c). Selle materjali omadused olid eelnevalt kogu kihi ulatuses homogeniseeritud. Samuti kasutati 2D mudelit, kus olid detailsemalt mudeldatud makrokapseldatud PCM ning tema roostevabast terasest kest (Joonis 23b). Mõlemat PCM lahendust võrreldi 1D võrdlusmudeliga, kus otse EPS soojustuse külge oli liimitud PV paneel (Joonis 23a). Peamise väljundina analüüsiti PV paneeli tagumise pinna temperatuuri.



Joonis 23. 1D ja 2D soojusliku analüüsi mudelid.

Vastavalt PV paneeli temperatuuridele ning fassaadile langeva kiirguse andmetele arvutati PV paneeli elektrotehnilisi omadusi (vt Lisa 4) arvesse võttes iga tunni keskmine PV paneeli temperatuurikorrigeeritud tootlikkus. Aastase summaarse tootlikkuse põhjal võrreldi erinevate PCM-idega lahenduste toimivust.

Selleks et valida iga uuritava asukoha jaoks sobiv faasimuutusmaterjal, määrati ära kaks peamist valikukriteeriumit. Esmalt summeeriti ühe test aasta vältel iga tunni keskmine päikeseenergia toodang, mida korrigeeriti PV paneelide efektiivsuse temperatuurist sõltuvate paranditega. Nende summeerimisel saadi aastane toodang ilma PCM-ita ning erinevate PCM lahendustega. Eesmärgiks oli maksimeerida elektritoodangu juurdekasv.

Samal ajal uuriti ka kõige kõrgemaid tunni keskmiseid PV paneeli pinnatemperatuure, kuna just ekstreemsed temperatuurid mõjuvad paneele füüsiliselt kahjustavalt. Võrreldi temperatuuriekstreemumeid ilma PCM-ita ning erinevate PCM lahenduste puhul.

Võrdlusesse kaasati kolm faasimuutusmaterjali (RT25HC, RT28HC ja RT35HC), mille nominaalne sulamistemperatuur oli kliimafailide suviste kõrgemate õhutemperatuuride suurusjärgus. Kapseldusmeetoditest uuriti makrokapseldamist roostevabast terasest kesta

sisse (90% PCM ja 10% roostevaba terast) ning polümeeriga kaetud PCM graanulite mikrokapseldamist krohvi sisse (45% PCM ning 55% krohv). Mõlemad protsendid tähistavad materjalide mahuprotsendilist jaotust. Arvutused teostati mõlemal juhul nii 30mm kui ka 40mm paksuse PCM kihi jaoks.

3.4.2 2D soojusarvutuse mudelid makrokapseldatud PCM-i kinnituslahenduste külmasildade hindamiseks

Erinevate teraskesta kapseldatud faasimuutusmaterjalide kinnituslahenduste soojusliku efektiivsuse hindamiseks loodi mitmeid 2D mudeleid kuue erineva kinnituslahenduse jaoks (vt Tabel 3 ja Lisa 5). Soojuslikku arvutust teostati 21 ööpäeva jooksul konstantsete temperatuuri ääritingimustega (sisetemperatuur +20°C ja välistemperatuur -20°C) kuni materjalikihtide temperatuuride stabiliseerumiseni. Ristlõigetel olid kombineeritud tavaline SILS sein ning aktiivelemendid vahetult 50% ja 50%. Seetõttu võib leitavaid soojusläbivusi (U) laiendada kogu fassaadi jaoks.

Tabel 3. Erinevad PCM-i ja PV paneelide kinnituslahendused, mille soojusläbivusi mudelitega arvutati.

Kinnituslahendus		Kasutatavad materjalid
1	Ilma PCM-ita baasmudel	200mm betoon (1)*, 10mm liimsegu (2), 200mm soojustus – EPS (3) või Fenool (14), 6mm fassaadikrohvi süsteem (8).
2	Ilma mehaaniliste kinnititeta**	200mm betoon (1), 10mm PU vaht (9) koos õhkvahedega, 150mm soojustus (3 või 14), 38mm PCM (7) roostevabast terasest kesta (6)
3	Väliskliimale avatud poldid	4 roostevabast terasest (6) M12 ankrupolti PCM kesta nurkades, Kummiseibid poltide ja PCM kesta vahel. Poldid on väliskliima mõjudele avatud.
4	Soojustusega kaetud poldid	4 polti (6) on kaetud 37mm jäigast XPS või PIR plaadist [nt Linirec (11)] katteribaga.
5	Roostevabast terasest kesta ümber soojustuse***	Tehases toodetud element (soojustus + PCM) on suletud 1,5mm seinaga roostevabast terasest (6) kesta sisse. Poltkinnitused (6) on aktiivelemendiga külgnägu soojustuse (3 või 14) taga.
6	Alumiiniumist kesta ümber soojustuse***	Analoogne lahendusega nr 5, kuid roostevaba terase asemel on kesta valmistatud alumiiniumist (12).

* Sulgudes olevad numbrid tähistavad materjali järjekorranumbrit. Vt materjalide omaduste tabelit Lisas 3

** Ilma ühegi mehaanilise kinnitusega lahendused võivad osutuda ohtlikuks.

*** Täielikult suletud metallkesta lahendused võivad olla ohtlikud, kui fassaadi eluea jooksul toimub vee või veeauru lekkimine kesta sisse.

Kuna arvutus viidi läbi lihtsustatud 2D ristlõigetega, kuid punkt külmasildade tõttu on tegemist 3D olukorraga, siis arvestati soojusläbivuse leidmisel erinevate ristlõigete (vt Lisa 5) kaalutud keskmise leidmisel 3D mõjude parandeid.

Punktkülmasildade 3D mõju arvestamiseks mitme 2D arvutusmodeli tulemuste põhjal kasutati lihtsustatud meetodit, mida on oma töös kirjeldanud (Hallik & Kalamees, 2020). Kaalutud keskmise arvutamisel arvestati lisanduv külmasillaga ristlõike pikkus (H_{add}) vastavalt valemile:

$$H_{add} = (L_{2D} - L_{2Dref}) * h_{TB} \quad (4)$$

Kus L_{2D} on külmasillaga ristlõike soojusläbivus [$W/(mK)$] ning L_{2Dref} on ilma külmasillata ristlõike soojusläbivus [$W/(mK)$]. h_{TB} on külmasilla pikkus kolmanda dimensiooni sihis [m].

Pärast lisanduva külmasilla pikkuse arvutamist lisati see reaalse külmasillaga ristlõike laiuzele ning erinevad ristlõiked liideti kaalutud keskmisena kokku ning saadi tulemuseks kogu 3D ristlõike soojusläbivus.

Kinnituslahendused 3 ja 4, kus PCM ja PV olid kinnitatud poltidega, kontrolliti täiendavalt üle veel ka standardikohase punktkülmasildade arvutusmetoodikaga (EVS 908-1: 2016). Erinevused kahe meetodi vahel olid üsna väikesed.

Kuna soojusläbivused olid arvutatud staatilises olukorras, siis on oluline märkida, et tarindi tegelikku soojusläbivust vähendab päris elus veel ka faasimuutusmaterjali temperatuure stabiliseeriv mõju. Sellega ei ole antud arvutuses arvestatud. Tekkiv viga on tagavara kasuks.

3.4.3 Tavalise SILS seinaga 1D soojus- ja niiskuservutuse mudel krohvi deformatsioonide hindamiseks

Mudeli eesmärgiks on teada saada erinevate kliimade jaoks äärmuslikud temperatuuri ja niiskuservutatsioonid. Prao tekke seisukohalt on ohtlik olukord see, kui materjal tõmbub võrreldes paigaldusolukorraga kõige enam kokku. See juhtub kuiva ja külma krohvi korral. Pragude tekkimise tõenäosus on suurem siis kui fassaad on krohvitud sooja ning niiske ilmaga. Sto paigaldusjuhend lubab fassaadi krohvida $+5^{\circ}C...+30^{\circ}C$ vahemikus (Sto-Armierungsputz, 2020). Mida soojema ilmaga krohvi paigaldada, seda suurem on pragude tekke tõenäosus. Seetõttu valime krohvi paigaldustemperatuuriks $+30^{\circ}C$. Niiskuservutatsioonide lähteasukohtadeks valime täiesti niiske krohvi.

Neid andmeid kasutades on võimalik leida konkreetse kliima ja konkreetse krohvi neelduvusteguri jaoks maksimaalne ilma deformatsioonivuugita krohvitav joonpikkus, mille korral on pragude tekke oht korrektset tehnoloogiat kasutades piisavalt väike.

Katseliselt on võimalik määrata krohvisüsteemi elastse tõmbekatsega tema elastsusmoodul E (MPa) ja purustava tõmbekatsega prao tekkeks vajalik pinge σ (MPa) (ETAG 004, 2013). Lihtsustades prao tekke lineaarseks protsessiks, saab leida pragu tekitava deformatsiooni ε (m/m):

$$\varepsilon_{critical} = \frac{\sigma}{E}$$

Teades krohvipinna värvusest sõltuvat kiirguse neelduvustegurit A , saab konkreetse kliima jaoks modelleerimistarkvara abil leida kriitilised temperatuuri ja niiskussisalduse muudud (paigaldustingimuste ja kriitiliste tingimuste vahe). Teades lisaks veel temperatuuri- ja niiskuspaisumistegureid α ja β , saame leida temperatuurist ja niiskusest tingitud maksimaalse deformatsiooni (m/m)

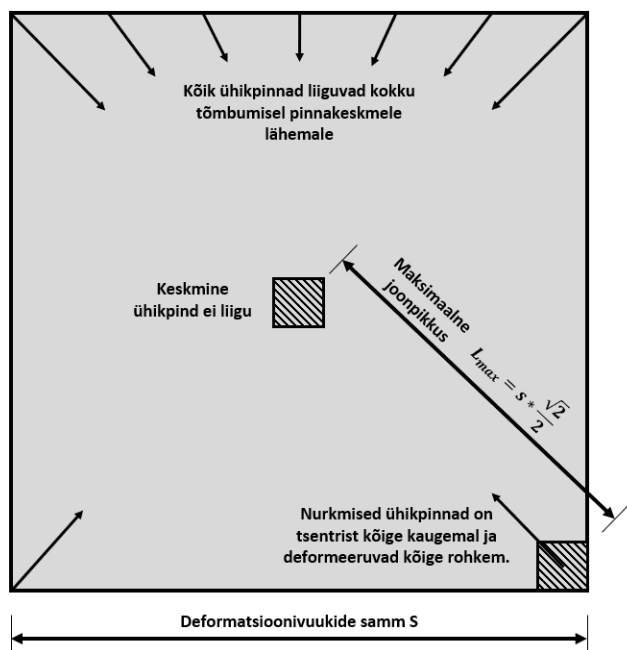
$$\varepsilon_{max} = \alpha * \Delta T + \beta * \Delta w$$

Kusjuures Δw (m³/m³) on materjali summaarne niiskussisaldus, võttes arvesse nii veeauru kui vedela vee kogust.

Maksimaalse korruga deformeeruva materjalipinna suurima joonpikkuse saab leida kriitilise ja maksimaalse deformatsiooni jagatisena.

$$L_{max} = \frac{\varepsilon_{critical}}{\varepsilon_{max}}$$

Lihtsustades seina deformatsiooniprofiilide vahelise ala ruudukujuliseks pinnaks, tekib kõige pikem deformatsioonidele alluv joonpikkus piki diagonaali.



Joonis 24. Ruudukujulise seinapinna kokkutõmbumist kujutav skeem

Seega on võimalik avaldada maksimaalne otstarbekas deformatsioonivuukide vaheline samm valemiga:

$$S_{max} = L_{max}\sqrt{2} = \frac{\varepsilon_{critical}}{\varepsilon_{max}}\sqrt{2}$$

Saadud valem annab teoreetilise ja ligikaudse soovitusliku sammu fassaadikrohvi deformatsiooniprofiilide paigaldamiseks.

Oluline on silmas pidada et tegemist on siiski ligikaudse hinnanguga ning täpsed prao tekke mehhanismid sõltuvad ka soojustusplaatide ning fassaadikrohvi omavaheliste deformatsioonide suhtest ning ehitustööde teostamise kvaliteedist.

Fassaadikrohvi temperatuuride leidmisel on kasutusel kolm erinevat neelduvustegurit. Need on valitud vastavalt soojus-ja niiskuslevi numbrilise arvutuse teostamise standardi kavandile (prEN 15026:200620, 2020):

1. Must krohvipind (neelduvustegur $\Lambda=0,8$)
2. Hall krohvipind (neelduvustegur $\Lambda=0,6$)
3. Valge krohvipind (neelduvustegur $\Lambda=0,4$)

Fassaadikrohvi deformatsioonide hindamiseks mõõdeti arvutusmudelitest krohvisüsteemi keskmise kihi temperatuuri ning niiskussisaldust. Kontrolliti ka krohvi sisemise ja välimise kihi temperatuuri ja niiskuse erinevuseid keskmise kihi suhtes. Kuna kriitiline on just võimalikult kuiv krohv, siis on täiendavad niiskuskooormused (nagu kandekonstruktsiooni ehitusniiskus) mudelist eemaldatud. Arvutused on teostatud Väike-Maarja kondensaadi testaastaga.

Oluline on ka märkida, et modelleerimisi teostatakse reeglina mineviku kliimaandmete põhjal ning reaalsed krohvile mõjuvad kliimakoormused võivad olla sellest erinevad.

3.4.5 Niiskusarvutuse testaastatega 1D ja 2D soojusliku arvutuse mudel, võttes arvesse PCM-i energiamahutavuse funktsiooni

See mudel on vajalik vaheetapp selleks et luua niiskusarvutuste jaoks PCM-i kihi taga oleva pinnatemperatuuri ääritingimust. Vaheetapi vajadus on tingitud sellest et Delphin 6 ei võimaldanud töö kirjutamise ajal siseenergia funktsiooni sisaldava materjaliga niiskusarvutusi teostada.

Arvutused teostati kriitiliste ilmakaarte jaoks (Tabel 2) kõigi viie kliimaga. Kasutati eelnevalt PV efektiivsuse analüüsides Kesk- ja Põhja-Euroopa kliima jaoks (Tallinn ja Lodz) välja selgitatud kõige efektiivsemaid PCM mikro- ja makrokapseldamise lahendusi (Tabel 4).

Teraskesta sisse makrokapseldatud PCM lahenduse puhul võeti PCM-iga arvutatud mudelist väljundina faasimuutusmaterjali sisemise kihi temperatuurid esimesel arvutusaastal ja tehti neist omaette kliimafaili. See kliimafail võttis seega arvesse tegelikku välistemperatuuri, kiirguse mõju PV paneeli tumedale pinnale ning PCMi temperatuuripuhverdamise võimet. Seda kliimafaili kasutati edaspidi niiskuservutuste ääritingimusena aktiivelementide piirkonnas.

Fassaadikrohvi sisse mikrokapseldatud krohvi puhul kasutati väljundina vahetult PV paneeli taga oleva materjali kihi temperatuure. Põhjuseks see, et niiskuservutustes ei saa krohvi sisse kapseldatud PCM kihi mõju hüljata, kuna niiskuslevi saab seal toimuda (erinevalt metallkestast).

3.4.6 Metallkesta sisse kapseldatud PCM-i ja PV-ga aktiivelemendi ning külgneva SILS seina niiskuservutus

Sellesse mudelisse sisestati tavalise SILS-i piirkonna soojustus ning fassaadikrohv koos väliskliima tingimustega ning aktiivelemendi piirkonnas kaasati mudelisse kõik PCM-ist sissepoole jäävad kihid. Ääritingimusena lisati veeaurutakistus $S_d=10000\text{m}$ väliskeskkonnale ning eelmise mudeli tulemusena loodud PCMi sisepinna temperatuuri funktsioon mudeli välispinnale (Joonis 25). PCM kesta tagune temperatuuri ääritingimuse pinnatakistus võeti väga väike, kuna selle materjali kihi vastas asub vahetult teine materjal. Seega arvutuses kasutati $R_{se}=0,001\text{ m}^2\text{K/W}$, millele vastab programmis sisestamiseks $U_{se}=1000\text{ W/m}^2\text{K}$. Asukohakliimaga seotud temperatuuri ja kiirguse ääritingimusi aktiivelemendi piirkonda ei lisatud, kuna nende mõju sisaldub juba peatükis 3.4.5 kirjeldatud mudeliga loodud temperatuurifailis.

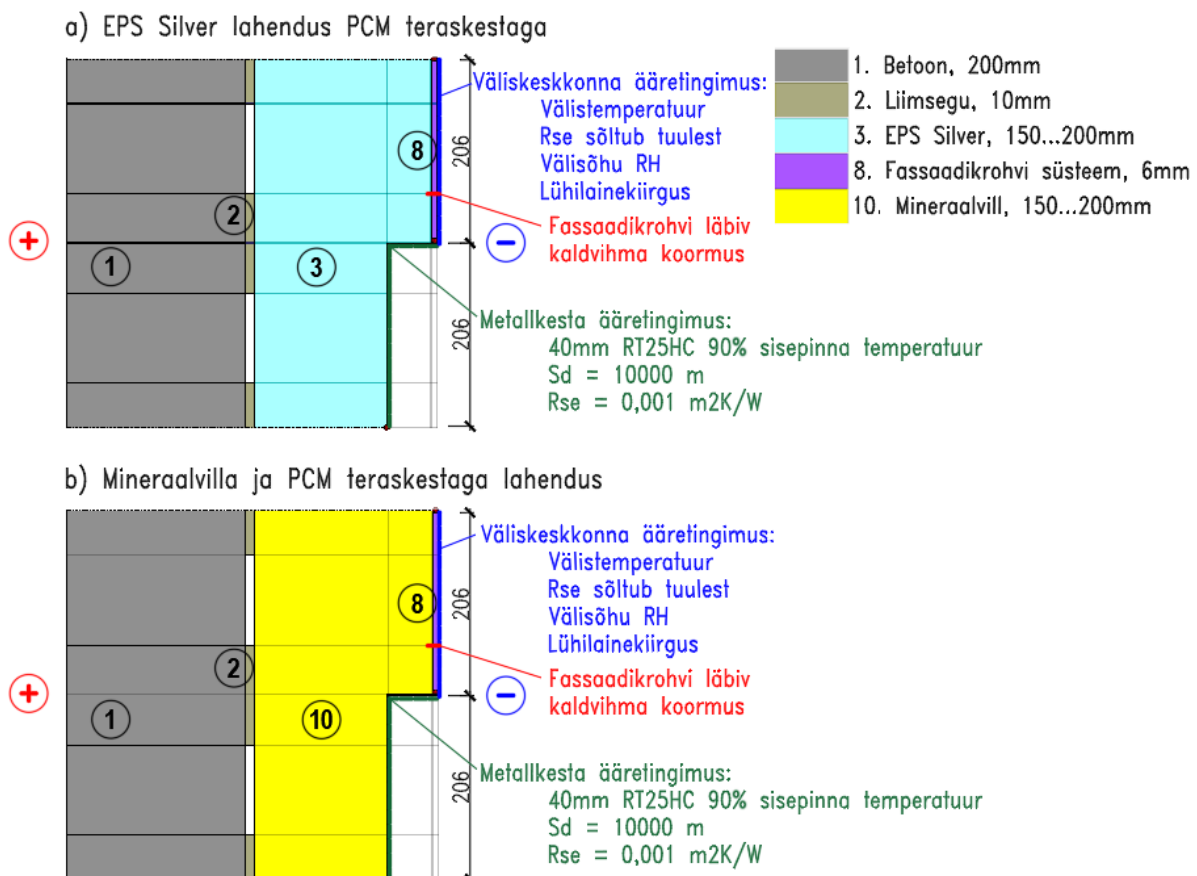
Arvutused tehti tagavara kasuks heleda krohvipinnaga (neelduvustegur $A=0,4$), kuna mida heledam on krohv, seda jahedam on krohvipind ning seda aeglasemalt kuivab niiskus välja.

Selle mudeli aktiivelemendi piirkonnast saadud temperatuure võrreldi erinevates mudeli kihtides (EPSi taga ja krohvi taga) PCM-i soojuservutuse mudeli tulemustega (vt ptk 3.4.5.) ning selgus, et need temperatuurid erinesid maksimaalselt 0,5 kraadi võrra. Seega on selline mudeldamise meetod asjakohane ning faasimuutusmaterjali soojusmahtuvuse funktsiooni asendamine samaväärse temperatuuri ääritingimusega on kohane.

Töö käigus prooviti ka varianti, kus jäeti PCM-i kiht niiskuse mudelisse alles ning lisati „simple energy source” funktsioon, mille saamiseks leiti soojusvoogude vahe PCM-i sise- ja välispinnal. Ääritingimustena kasutati samu väliskliima tingimusi, kuid niiskusearvutuste teostamiseks eemaldati PCM-i kihilt faasimuutuse funktsioon. Siiski ei suutnud selline mudeldamisviis tagada konstruktsiooni teistes kihtides temperatuure, mis sarnaneksid PCM-iga tehtud arvutuses, mistõttu sellisest lähenemisviisist loobuti.

Väljundina uuriti graafiliselt (2D RH graafik sõltuvalt ajahetkest) niiskuse liikumist veeaurutiheda väliskihi tagant tavalise SILS osa taha ning seina välja kuivamist sealt kaudu. Erinevate lahenduste võrdlemiseks kasutati mahulisi niiskuse koguseid kriitilistes materjalikihtides (vahetult veeaurutiheda kihi taga, ning krohvi ja PV paneeli liitekohas).

Vastavalt arvutusmudeli geomeetriaale (Joonis 25) on fassaadist kuni 50% kaetud PV paneelidega ning paneelide samm võrdub nende laiussega (411mm). Suurendades veeaurutiheda PCM+PV osakaalu fassaadi pinnas, peaks lokaalne niiskuskogumus SILS krohvile PCM+PV elemendi perimeetril suurenema.



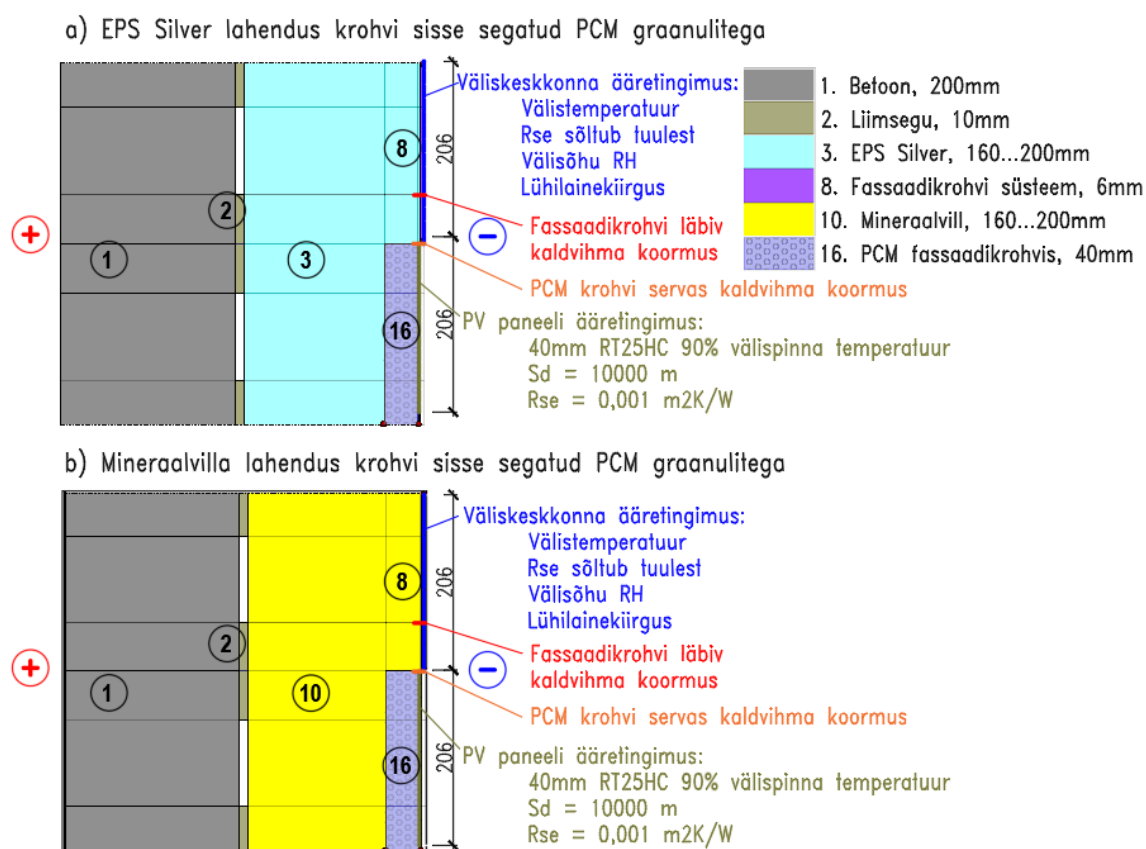
Joonis 25. Tüüpilised ristlõiked roostevabast terasest kesta külge liimitud 412mm laiuse PV paneeli niiskusearvutuseks.

3.4.7 Krohvi sisse mikrokapseldatud PCM graanulitega aktiivelemendi ning külgneva SILS seina niiskusrarvutus

Kui roostevabast terasest kesta sisse kapseldatud faasimuutusmaterjali ja PV paneeli kompleksi võib mudeldada veeaurutihedana, siis PCM graanuleid sisaldavat paksu krohvikihhti niiviisi lihtsustada ei ole korrektne. Seetõttu jäeti niiskusrarvutuse mudelisse alles paks krohvikihht, kuid kuna selle siseenergia funktsiooni kasutada ei ole võimalik, siis rakendati soojuslikust mudelist (vt ptk 3.4.5) loodud PCM-i ääritingimust PV paneeli taha. PV paneel asendati ääritingimusega $S_d=10000\text{m}$ ning eemaldati kiirgus ja välistemperatuur, kuna neid võtab asendus temperatuuri ääritingimus juba arvesse.

Väljundina uuriti graafiliselt (2D RH graafik sõltuvalt ajahetkest) niiskuse liikumist veeaurutiheda väliskihi tagant tavalise SILS osa taha ning seina välja kuivamist sealt kaudu. Erinevate lahenduste võrdlemiseks kasutati mahulisi niiskuse koguseid kriitilistes materjalikihtides (vahetult veeaurutiheda kihi taga, ning krohvi ja PV paneeli liitekohas).

Kui metallkesta puhul ei too PV paneeli taha jäävate materjalide külmumine kaasa seina lagunemist, siis krohvi sisse kapseldatud PCM graanulite puhul on see oht olemas, kuna niiske krohv võib külmudes üleliia paisuda. Seetõttu uuriti ka PV paneeli taga oleva krohvi külmumist.



Joonis 26. Tüüpilised ristlõiked PCM graanulitega rikastatud fassaadikrohvi külge liimitud 412mm laiuse PV paneeli niiskuslikuks arvutuseks.

3.4.8 2D niiskuslevi arvutus difusioonikanalitega tarindile

Selleks et võimaldada niiskusel välja kuivada ka muul moel kui aktiivelemendi tagant külje peale välja kuivades, võib olla otstarbekas kasutada paneelide taga alt avatud difusioonikanaleid või nii alt kui ülevalt avatud konvektsioonikanaleid. Käesolevas töös on jäetud konvektsiooni mõju tagavara kasuks arvestamata.

Arvutusmodeli ääritingimustena kasutati samuti soojusarvutuste tulemusena genereeritud ääritingimusi. Kuna aktiivelemendi tagune niiskus kuivab nüüd välja läbi tema enda taga olevate difusioonikanalite, siis kõrval asuvat tavalist SILS seina enam ei mudeldatud. Difusioonikanalitega tarindit mudeldati vaid krohvi sisse makrokapseldatud PCM graanulite korral.

PCM krohviga lahenduse puhul on kõige lihtsam difusioonikanaleid tekitada PCM krohvi paigaldamisel pealmise kihi töötlemisel suure hambaga segukammiga. Hiljem PV paneeli krohvi külge liimides paigaldatakse õhuke liimikiht PV paneeli tagaküljele ning kammitud kanalite geometria säilib. Arvutusmodelis on kasutatud suure hambaga (12x12mm) segukammiga tõmmatud, kammi 45 kraadise nurga all hoides tekkivat difusioonikanali suurust laiussega 12mm ning sügavusega 10mm.

Kui traditsioonilisel segukammil on kanalite ja kanalite vahelise ala suhe 1:1, siis selline difusioonikanalite tihedus jätaks PV paneeli ja PCM krohvi vahele liialt väikese kontaktpinna. See halvendaks PCM-i võimet kiirguse mõjul täielikult sulada ning võrdlemisi suuri graanuleid sisaldav PCM krohv ei pruugi 12mm laiuste ribadena püsida. Seetõttu on arvutustes lähtutud lamekatustes kasutatava difusioonikanalitega villaplaadi indikatiivsest kanalite sammust 150mm. 12x12mm segukammi puhul tähendaks see, et ära tuleks lõigata enamik hambaid, jättes alles iga kuuenda hamba. Sedasi tuleks difusioonikanalite sammuks 144mm (Joonis 27).

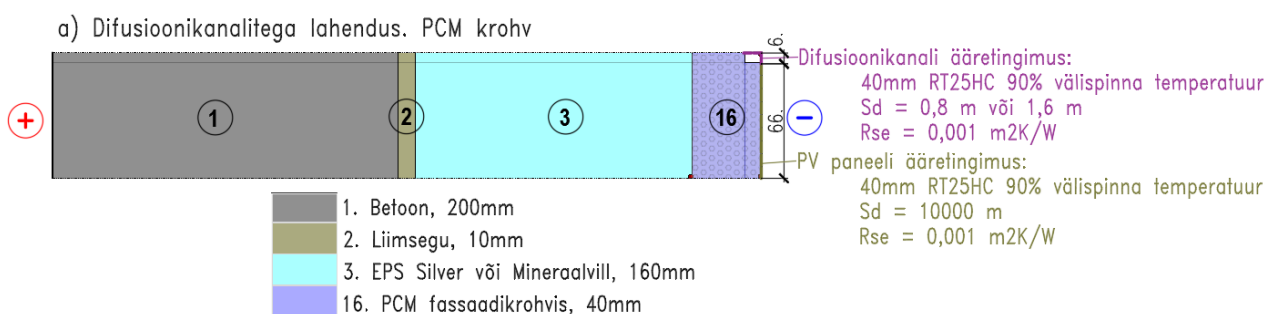


Joonis 27. PCM krohvi sisse difusioonikanalite loomiseks kasutatava 12x12mm hammastega segukammi kontseptsioon

Modelleeriti üks sümmeetriline pool ühest difusioonikanali vahest. Pool difusioonikanali laiuusest on 6mm ning pool difusioonikanalite vahelisest alast on 66mm (Joonis 28).

Difusioonikanali kliima koosneb PCMi taga mõõdetud temperatuurist ning pinna veeauru takistusest vastavalt kas $S_d=1,6\text{m}$ (vastab alt avatud difusioonikanali kõige kaugemale punktile, kui PV paneeli kõrgus fassaadis on 1,6m) või $S_d=0,8\text{m}$ (vastab nii alt kui ülevalt avatud kanalitele, konvektsiooni mõjuga arvestamata). Kanalite vahelise ala väliskliima koosneb samast temperatuurifailist ning PCMi ja PV paneeli suurt veeaurutakistust simuleerivast ääritingimusest $S_d=10000\text{m}$.

Täiendavate niiskusallikatena on mõnes arvutuses lisatud betoonile algniiskus $0,11\text{m}^3/\text{m}^3$ ja 1% kaldvihma koormus kogu PV paneeli tagusele pinnale.



Joonis 28. Difusioonikanalitega arvutusmodeli ristlõige. Difusioonikanalid on tekitatud segukammiga krohvi sisse kanalite tõmbamise teel. Selline ristlõige vastab ükskõik kui laiale PV paneelile, mille kõrgus on 1600mm.

4. TULEMUSED

4.1 Sobiliku faasimuutusmaterjali lahenduse valimine

Erinevate faasimuutusmaterjalide lahendustega teostatud soojusarvutuste tulemusel selgus et optimaalne faasimuutusmaterjal Tallinna ja Lodzi jaoks on RT25HC ning Madridi jaoks RT28HC (vt Tabel 4 ja Lisa 7). Tulevikus teiste linnade optimaalse PCM toote valikuks tuleks läbi arvutada faasimuutusmaterjalide kandidaadid, mille nominaalne sulamistemperatuur oleks ca 0...10 °C madalam suvistest ühe tunni keskmistest õhutemperatuuride maksimumidest. Sel juhul tegeleb PCM kiirgusest tingitud pinna soojenemisega ning suudab öösel jällegi efektiivselt tahkeks muutuda.

Tabel 4. Elektrienergia tootlikkuse kasv ja ekstreemsete pinnatemperatuuride langused erinevate PCM lahenduste puhul kolmes uuritavas kliimapiirkonnas. Rohelised lahtrid tähistavad kõige efektiivsemat roostevaba kestaga lahendust, kollased lahtrid efektiivsemat krohvi sisse mikrokapseldatud lahendust. Tootja poolt lubatud PV maksimaalne töötemperatuur on 85°C (Flisom AG, 2021).

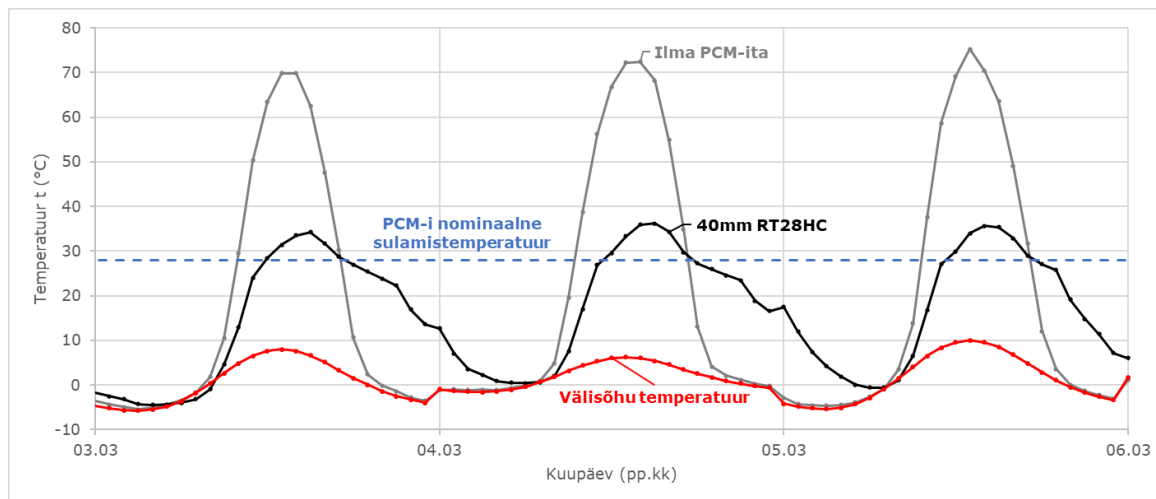
		TALLINN, EESTI			LODZ, POOLA			MADRID, HISPAANIA		
PCM tüüp	PCM pak-sus (mm)	Max temp* (°C)	PV aastane energia toodang (kWh/m ²)	Efektiivsuse kasv %	Max temp* (°C)	PV aastane energia toodang (kWh/m ²)	Efektiivsuse kasv %	Max temp* (°C)	PV aastane energia toodang (kWh/m ²)	Efektiivsuse kasv %
Ilma PCM-ita	0	82.7	39.28	0.00%	81.0	35.59	0.00%	91.2	53.66	0.00%
RT25H C 45%	30	73.0	40.15	2.22%	72.7	36.17	1.64%	82.1	55.20	2.88%
	40	68.0	40.34	2.72%	69.6	36.26	1.88%	76.8	55.59	3.60%
RT28H C 45%	30	70.9	40.15	2.23%	70.3	36.14	1.55%	80.6	55.32	3.10%
	40	64.0	40.33	2.68%	66.8	36.21	1.76%	74.1	55.68	3.78%
RT35H C 45%	30	67.2	40.10	2.10%	67.5	36.05	1.31%	78.6	55.38	3.21%
	40	58.9	40.23	2.43%	61.0	36.12	1.49%	70.6	55.68	3.78%
RT25H C 90%	30	66.6	40.63	3.44%	69.0	36.40	2.29%	74.4	56.11	4.57%
	40	62.7	40.73	3.69%	66.0	36.45	2.43%	68.5	56.34	4.99%
RT28H C 90%	30	61.1	40.59	3.36%	66.4	36.33	2.10%	68.9	56.22	4.77%
	40	56.7	40.68	3.57%	63.3	36.38	2.23%	64.7	56.37	5.06%
RT35H C 90%	30	51.3	40.42	2.92%	52.8	36.21	1.75%	62.8	56.16	4.66%
	40	43.7	40.49	3.09%	43.8	36.27	1.92%	56.3	56.26	4.86%

*Max temp on maksimaalne tunnine keskmine PV paneeli pinnatemperatuur

Roostevabast terasest kesta sisse kapseldamise lahendus on efektiivsem kui krohviga segatud mikrokapslite kasutamine (vt Tabel 4), kuna PCM kogus ühes pinnaühikus on suurem. Samas on kesta tootmine ilmselt keerulisem ning kallim protsess, mistõttu vajab lõplik otsust ka majandusanalüüsi läbi viimist. Samuti on nende lahenduste niiskusklik toimivus vägagi erinev.

Elektritoodangu efektiivsuse põhjal välja valitud PCM lahenduste puhul õnnestus langetada aastaseid temperatuurimaksimume Tallinnas 20°C võrra (83°C-lt kuni 63°C-ni), Lodzis

15°C (81°C-lt kuni 66°C-ni) ning Madridis 27°C (92°C-lt kuni 65°C-ni). Valides toodangu mõttes pisut vähemefektiivse kuid kõrgema sulamistemperatuuriga faasimuutusmaterjali, on võimalik maksimumtemperatuure veelgi vähendada.



Joonis 29. PV paneeli tagumise pinna temperatuurid kolmel kõrge päikesekiirgusega märtsikuu päeval Madridis 40mm RT28HC (90%) lahenduse juures. Keskpäevased temperatuurimaksimumid alanevad õiget faasimuutusmaterjali kasutades kuni 35°C.

Ühe testaasta pikkuste arvutustulemuste graafikutelt on näha, et PCM-i positiivne mõju PV toodangu suurendamisel tuleb külmas kliimas ennekõike välja suvistel perioodidel (vt Lisa 7 ja PCM mõju ulatust Joonis 29). Tallinnas ja Lodzis ei hakka ca poole aasta vältel faasimuutusmaterjal üldse sulama, kuna pinnatemperatuurid on liialt madalad. Seevastu aastaringelt päikeselises Madridis on PCM mõju tuntav kogu aasta vältel, mistõttu on ka saavutatav efektiivsuse tõus suurem.

Faasimuutusmaterjali temperatuuriekstreemumeid pehmendav mõju on hästi märgatav, kui analüüsida ühe kuu vältel kõikide päevade maksimaalse ja minimaalse PV paneeli pinnatemperatuure PCM lahenduse ning võrdlusmodeli vahel (vt Lisa 8). Võrreldes PCM-i temperatuuri stabiliseerimise mõju ulatust jaanuari ja juuli kuus on näha, miks ei ole PCM mõju elektritoodangule nii suur kui võiks ühe optimaalse ööpäeva tulemuste põhjal arvata. Kui juulis langetab faasimuutusmaterjal ööpäevaseid temperatuurimaksimume kõigis kolmes asukohas märgatavalt, siis jaanuari kuus töötab PCM tõhusalt vaid Madridis. Tallinnas on jaanuari kuised temperatuurid sedavõrd madalad ning päikesekiirgust sedavõrd vähe et faasimuutusmaterjal ei saa tõhusalt tööle hakata. Seevastu on juulis PCM lahendus kõige tõhusam just Tallinnas, kuna suure laiuskraadi tõttu langevad suvised päikesekiired lõunafassaadile soodsama nurga alt kui Poolas või Hispaanias ning puhverdamist vajav kiirguse mõju on ulatuslikum.

4.2 Faasimuutusmaterjali kapseldamise ja kinnitamise lahenduste soojuslik toimivus

Tabel 5 on näha et roostevabast terasest PCM kesta kinnitamiseks kandekonstruktiooni külge võiks olla kõige ratsionaalsem lahendus number 3 - metallkesta igas neljas nurgas on soojustust läbiv roostevabast terasest ankrupolt, mis on kestast endast eraldatud kummiseibide abil. Kasutades aktiivelemendi piirkonnas EPS soojustuse asemel PIR või fenoolsoojustust, on võimalik saavutada olukord, kus aktiivelemendi piirkonna soojuslik efektiivsus on 93% ülejäänud seinast, hoolimata sellest et aktiivelemendi soojustuse paksus on 25% väiksem. Poldipeade katmine (lahendus nr 4; vt Lisa 6) langetab soojusläbivust veel täiendavalt ca 0,01 W/(m²K), kuid muudab lahenduse keerukamaks ning visuaalselt liigendatumaks. Poltide katmise majanduslik otstarbekus vajab edasist uurimist. Soojustuse ja PCM-i koos ühise metallkesta sisse paigaldamine (lahendused 5 ja 6) tõstavad kogu seina terviklikku soojusläbivust ca 25%, kuid kuna roostevabast terasest või alumiiniumist lehtmaterjal läbib kogu soojustust, siis tekitab see intensiivse joonkülmasilda ning ühekihilise raudbetooni või betoonploki puhul võib tekkida probleeme tarindi sisepinna temperatuuridega. Samuti on need lahendused niiskuskult riskantsed. Kuigi arvutuslikult on sellised aktiivelemendid täiesti hermeetilised ning niiskusega seotud probleemid peaksid olema välistatud, siis võib reaalse seina puhul väiksemgi ebahermeetilisus tekitada tiheda teraskesta sees suuri niiskuse kontsentratsioone.

Kuna erinevate lahenduste soojusläbivuste arvutamist teostati konstantsete ääritingimustega statsionaarses olukorras, siis ei ole faasimuutusmaterjali $u(T)$ funktsiooniga arvestatud. Seega on siin toodud soojusläbivused ilmselt pisut ülehinnatud ning päris lahendused on veidi tõhusamad, kuna öösel, madalate välistemperatuuride juures takistab parasjagu tahkeks muutuv faasimuutusmaterjal tarindi sisemiste kihtide jahtumist. Tõenäoliselt jääb see mõju aga paari protsendi piiresse. Kuna kehtivad standardid hoonete välispiirete soojusläbivuste arvutamiseks eeldavad statsionaarse olukorra arvutust, ei oleks võimalik hoone projekteerimise protsessis faasimuutusmaterjali kihi dünaamilise mõjuga arvestada.

Tabel 5. Erinevad lahendused teraskesta sisse kapseldatud PCM-i kinnitamiseks kandekonstruktsiooni külge. Kogu seina soojuslähivuste ja soojusliku efektiivsuse võrdlus. Lahenduste soojuslähivused vastavad olukorrale kus fassaadi kogu pindalast 50% on kaetud aktiivelementidega.

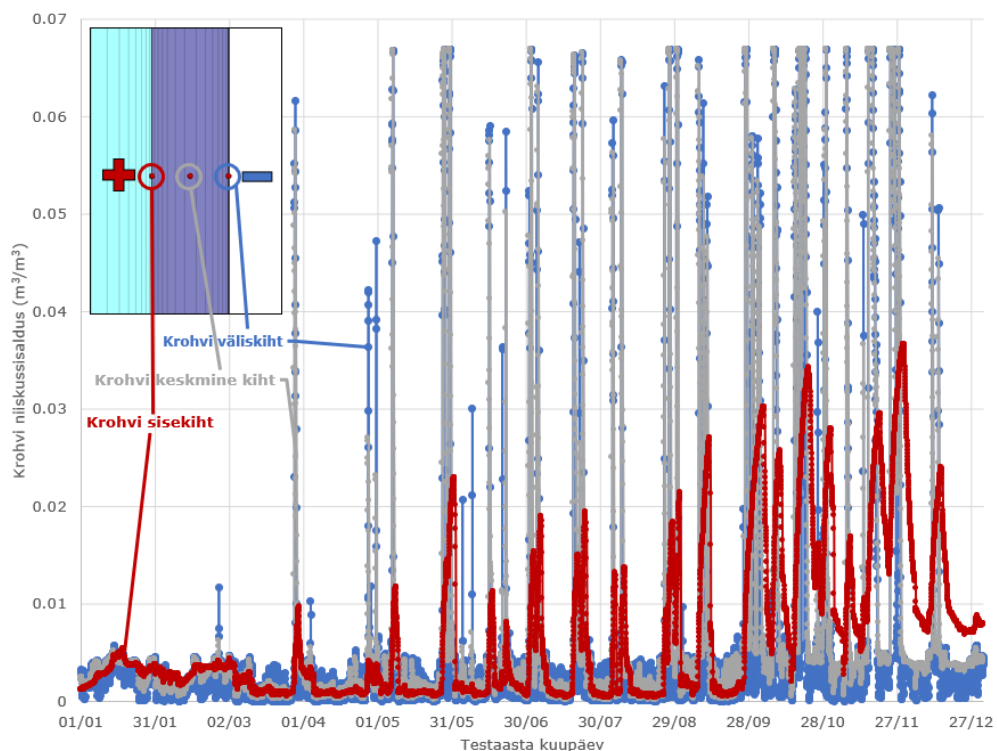
Kinnituslahendus	EPS Silver ($\lambda=0.034$)		Fenool ($\lambda=0.021$)	
	Soojuslähivus U [W/(m ² K)]	Efektiivsus	Soojuslähivus U [W/(m ² K)]	Efektiivsus
1 Ilma PCM-ita baasmudel	0,161	100%	0,106	152%
2 Ilma mehaaniliste kinnititeta	0,185	87%	0,151	107%
3 Väliskliimale avatud poldid	0,207	78%	0,173	93%
4 Soojustusega kaetud poldid	0,195	83%	0,162	99%
5 Roostevabast terasest kest	0,221	73%	0,189	85%
6 Alumiiniumist kest	0,253	64%	0,223	72%

4.3 Temperatuuri- ja niiskusdeformatsioonide ulatus erinevates kliimades. Deformatsioonivuukide samm

Mida soojema ilmaga krohvi paigaldada, seda suurem on pragude tekke tõenäosus. Krohvi paigaldustemperatuuriks valiti tootja poolt kõrgeim lubatud paigaldustemperatuur +30°C. Niiskusdeformatsioonide lähteasitsiooniks valiti suurim krohvi sisse mahtuv niiskuse kogus 0,067m³/m³.

Esmalt kontrolliti, kas temperatuuri ning niiskusdeformatsioonide mõõtmise on vajalik teostada eraldi krohvi väliskihi, keskmise kihi ning sisemise kihi jaoks. Selle jaoks võrreldi 5mm paksuse krohvikihi temperatuuri ning niiskussisaldust sügavusel 0; 2,5 ja 5 mm krohvi välispinnast. Selgus, et temperatuuride osas ei ole vahet, millises krohvikihi punktis temperatuuri mõõta, kuna aastase temperatuuride erinevuse puhul 96,6°C erines sisemise ja välimise kihi temperatuur maksimaalselt kõigest 0,6°C võrra. Seda saab põhjendada krohvisüsteemi suhteliselt kõrge soojuseri juhtivuse ($\lambda=0,7$ W/m*K) ja väikese paksusega.

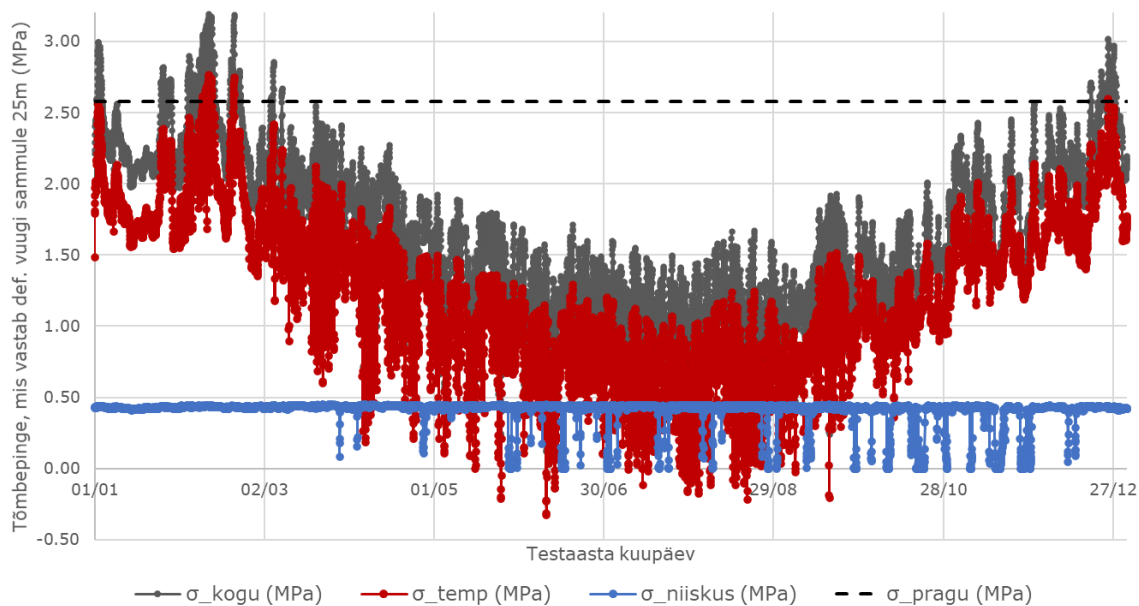
Küll aga erinesid krohvi eri kihtide niiskussisaldused. Joonis 30 on näha, et kõige suuremad niiskussisalduste kõikumised on krohvi välimises kihis ning krohv tervikuna on kõige niiskem sügisel. Ka kõige madalamad talvised niiskussisaldused, mis on krohvi toimivuse mõttes võtmetähtsusega, on enim esinevad just kõige välimises krohvikihis.



Joonis 30. Tavalise SILS seinaga Väike-Maarja kondensaadi testaastaga, edelakaare halli värvi seina jaoks tehtud arvutus näitab, et kõige suuremad niiskussisalduse kõikumised toimuvad krohvi välises kihis, mis on sademetele ja aurumisele avatud.

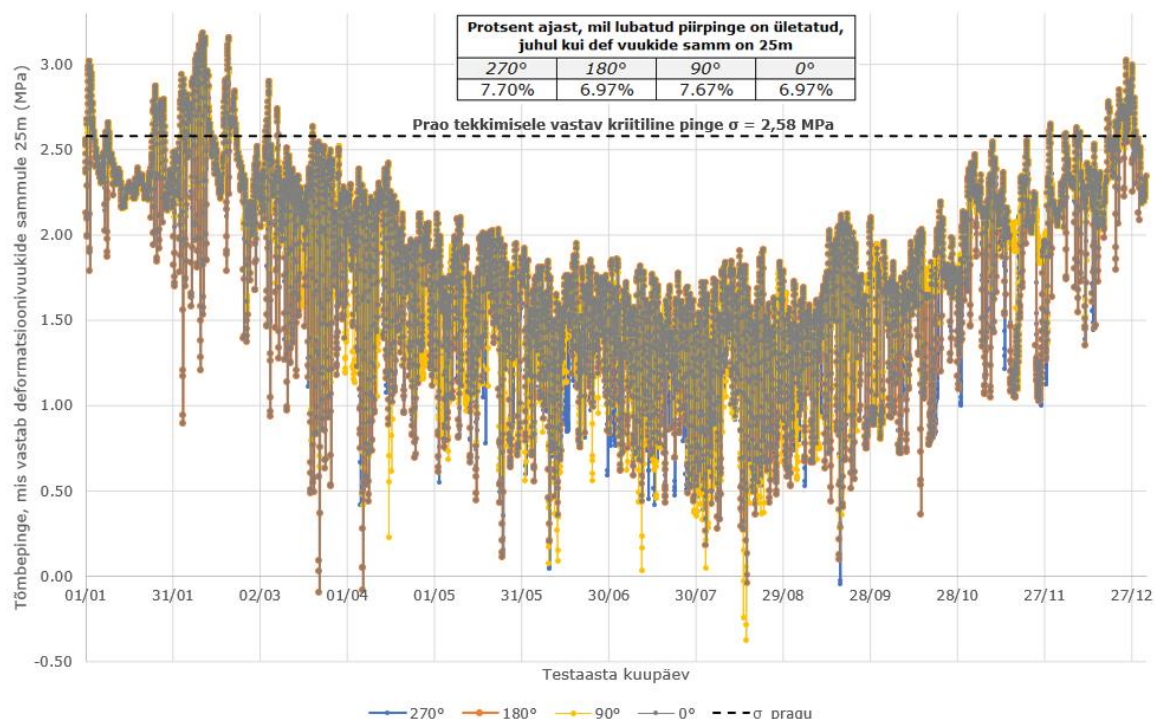
Krohvisüsteemi pragunemise piirpinge pinge mõõdeti esimese prao tekkimise hetkel mil armeerimisvõrk veel tööle ei hakanud (Volkova et al., 2021). Ka see pragu tekkis krohvisüsteemi välismisele pinda. Kui krohvisüsteemi välimine kiht praguneb, siis satub niiskus ka sellesse mikroprakku ning temperatuuri ja niiskusdeformatsioonidele lisaks hakkab toimuma niiskuse külmumine praos. Seega on edaspidises analüüsis kasutatud krohvisüsteemi välimise kihi deformatsioone.

Uurides eraldi temperatuuri- ning niiskusdeformatsioone, on näha, et temperatuurist tingitud kahanemised on intensiivsemad talvel, vähemintensiivsed suvel (Joonis 31). Niiskusdeformatsioonide esinemine sõltub konkreetse ajahetke kaldvihma koormustest, kuid kuna suurem osa ajast on fassaadikrohvi pind kuiv, tuleks maksimaalne niiskusdeformatsioon aasta ringselt temperatuurideformatsioonidele juurde liita.



Joonis 31. Fassaadikrohvis tekkivate temperatuurikahanemise ning niiskuskahanemise pingete jaotus valgel Väike-Maarja läänefassaadil deformatsioonivuukide sammuga 25m.

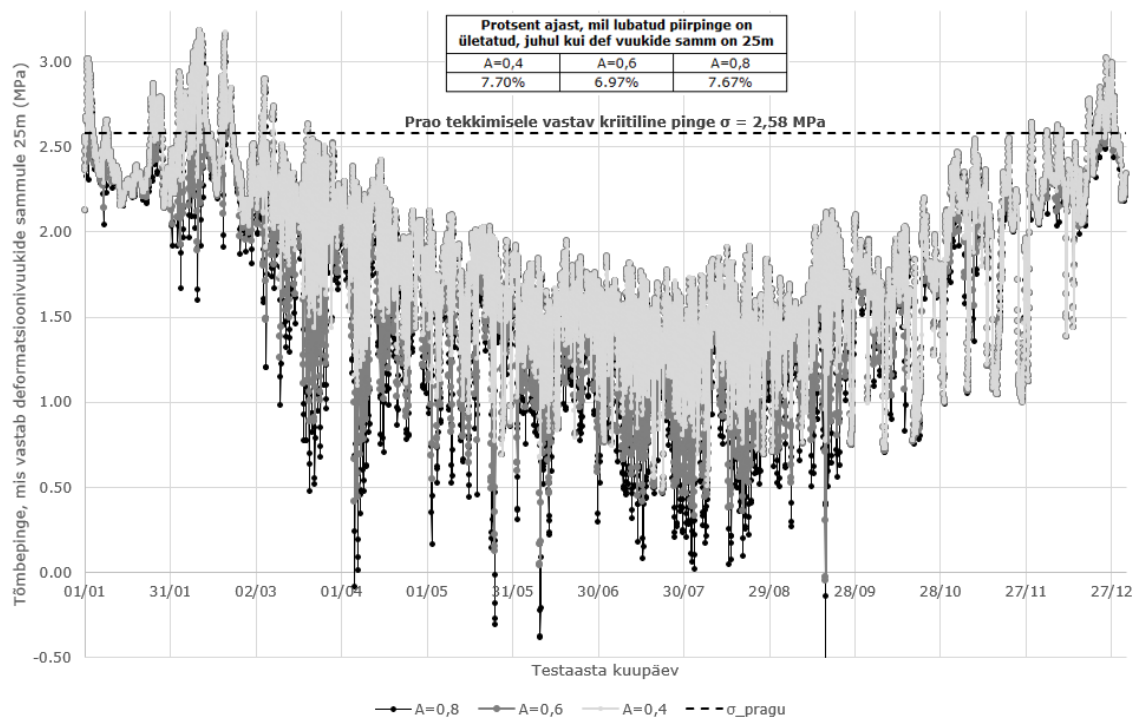
Seejärel oli oluline välja selgitada, millise ilmakaare suhtes on deformatsioonid kõige kriitilisemad. Ühest küljest on kriitiline päikesekiirgus, mis krohvi talvel kuivatab. Samas, mida hiljem päike hakkab krohvi soojendama, seda külmem on krohvi pinnatemperatuur. Nagu näha Joonis 32, ei oma see, millise ilmakaare suhtes kriitilisi deformatsioone vaadata, väga suurt mõju. Siiski on kriitiliste deformatsioonide hulk põhiilmakaarte võrdluses kõige suurem läänefassaadi krohvi puhul. Seetõttu analüüsime edaspidi läänefassaadi krohvi.



Joonis 32. Fassaadikrohvis tekkivate tõmbepingete suurus põhiilmakaarte võrdluses olukorras, kus fassaadikrohvi deformatsioonivuukide samm on 25 meetrit.

Võrreldes omavahel valget (neelduvustegur $A=0,4$), halli ($A=0,6$) ja musta ($A=0,8$) krohvitud fassaadi (Joonis 33), näeme et ka siin ei ole deformatsioonide osas suurt erinevust kui võrrelda kõige kuivemat ning külmemat hetke krohvi paigaldamise hetkega. Küll aga on erinevusi kevadsuvisel ajal tumeda krohvi temperatuuripaisumise ulatuses, mis võib siiski mõjutada krohvisüsteemi eluiga lõuna-, edela- või läänesuuna fassaadidel. Kuna enamik fassaadikrohve on siiski heledad, analüüsitakse edaspidi krohvitud fassaade, mille neelduvustegur on 0,4.

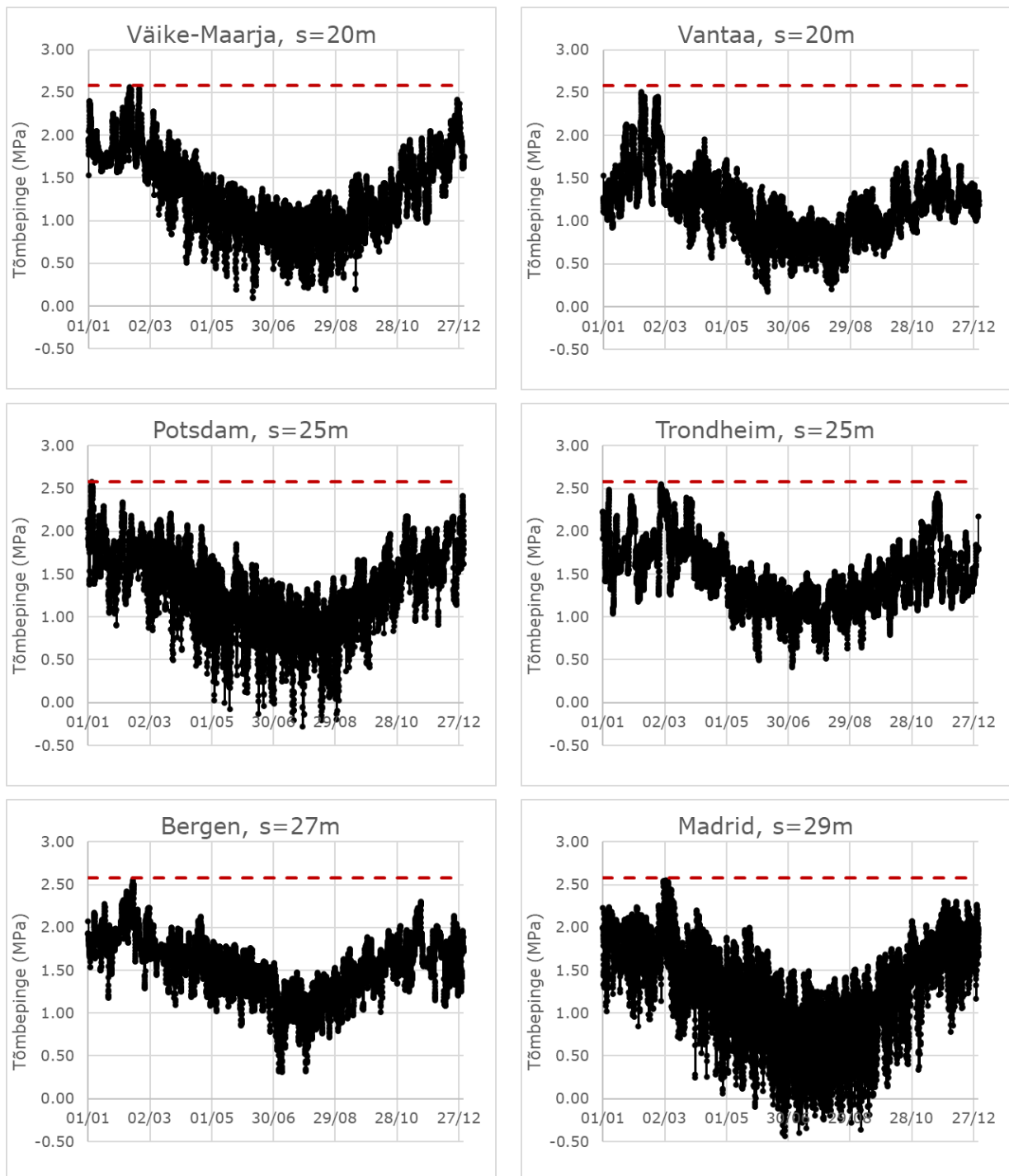
Tumedate ($A=0,8$ ja kõrgem) soojusisolatsiooni liitsüsteemi krohvide puhul võib krohvisüsteemi lagunemise seisukohalt määravaks saada liigne temperatuuripaisumine ja sellest tulenev krohvisüsteemi purunemine survele koos nakke kadumisega - selle vältimiseks ei ole tumedad krohvid üldjuhul lubatud või tuleb need teostada erilahendusena (nt paksem krohvisüsteem, topelt armeering või soojuskiirgust peegeldav värv). Käesolevas töös kirjeldatud meetod ei saa tõenäoliselt tumedate krohvide lagunemise puhul määravaks.



Joonis 33. Fassaadikrohvis tekkivate tõmbepingete suurus eri värvi fassaadide puhul. Kõigis arvutustes on käsitletud Väike-Maarjas asuvat läänekaare fassaadi, kus fassaadikrohvi deformatsioonivuukide samm on 25 meetrit.

Kõigi viie analüüsitud kliima jaoks dimensioneeriti deformatsioonivuukide samm selliselt, et niiskuservutuse kriitilise testaasta jooksul ei ületaks krohv tekkiv tõmbepinge krohvi mõõdetud tõmbetugevust mitte ühelgi ajahetkel. Kuna niiskuservutuse testaastate näol on tegemist niigi iseäranis külmade aastatega (seda eriti tuleviku kliima perspektiivis) siis täiendavat varutegurit ei kasutatud. Soovituslik deformatsioonivuugi samm on antud iga kliima jaoks 1 meetri täpsusega (Joonis 34).

Näiteks Väike-Maarja kliimas on soovituslik deformatsioonivuugi samm heleda krohvi puhul maksimaalselt 20 meetrit (Joonis 34). See tähendaks et ühe Hruštšovka tüüpi 5-korruselise paneelilamu renoveerimise puhul võib otsaseina krohvida ühes osas, kuid akendega külgeinte jaoks on vajalik krohvipind deformatsioonivuukidega liigendada iga kahe korteri või ühe trepikoja tagant (st et deformatsioonivuugid peaksid asuma joonel, kus on kahe eri trepikoja korterite vaheline sein). 9-korruseliste Nõukogudeaegsete hoonete jaoks on lisaks vajalik ka üks horisontaalne deformatsioonivuuk. Paraku tänases ehituspraktikas enamasti selliseid deformatsioonivuuke ei tehta.



Joonis 34. Eri kliimade jaoks optimaalsed SILS seinakrohvüsteemi deformatsioonivõime (s). Punane punktirjoon tähendab valitud krohvüsteemi lubatud tõmbepinge piiri.

4.4 Niiskustehniline toimivus. Traditsiooniline SILS sein.

Traditsioonilise SILS seinaga tehtud baasmudeli arvutamise tulemusena leitavad krohvi niiskussisaldused ning krohvi taga oleva soojustusmaterjali suhtelised niiskused võetakse

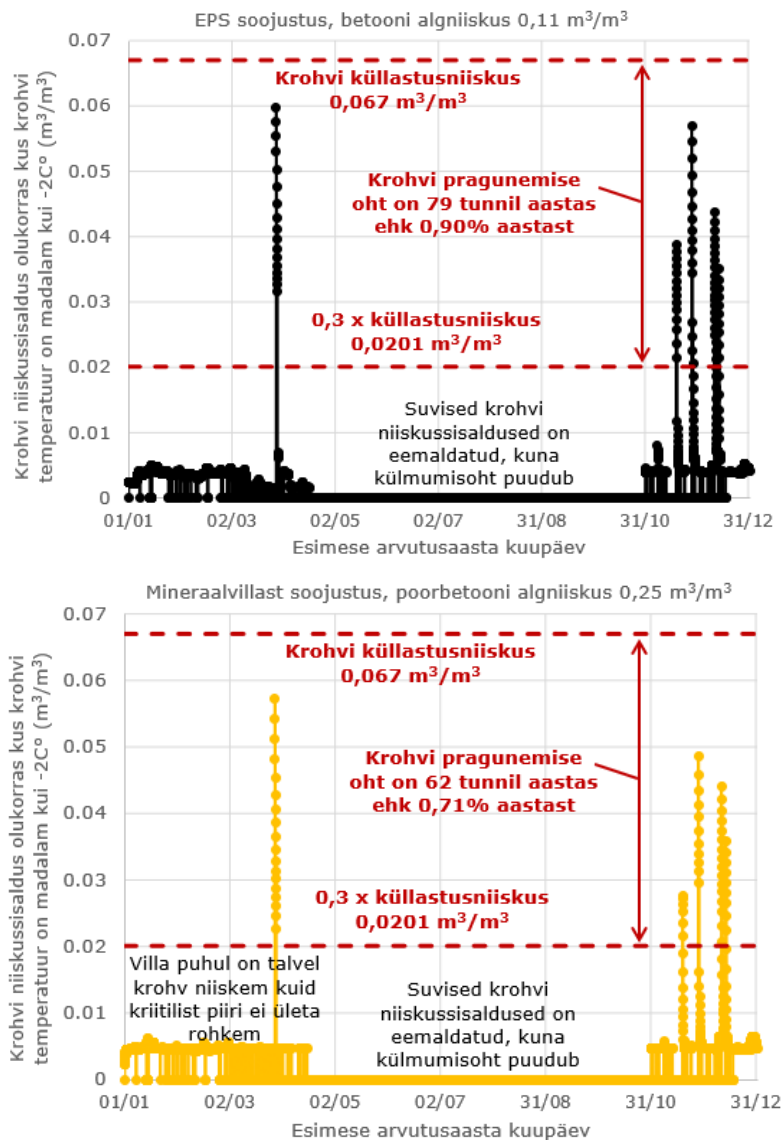
edaspidi energiaaktiveeritud lahenduste jaoks võrdlusbaasiks. Tavalise SILS seinä mudel on ka heaks aluseks erinevate soojustusmaterjalide ning erinevate niiskuskooormuste mõju analüüsimiseks, saamaks aru, millised tegurid seinä toimivust mõjutavad.

Käesoleva peatüki mudelites on kasutatud täiendavaid niiskuskooormuseid nagu betooni algniiskus $0,11 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ja poorbetooni algniiskus $0,25 \text{ m}^3/\text{m}^3$, mis vastab ehituse ajal niiskunud poorbetoon seinäle. Lisaks on kasutatud krohvi kihti läbiva kaldvihma kooormust, mis vastab 1% kogu kaldvihma kooormusest. Uuritud on krohvisüsteemi keskmise kihi temperatuuri ja niiskussisaldust ning soojustusmaterjali välamise kihi suhtelist niiskust. Kõigi asukohtade arvutustes on kasutatud niiskustehniliselt kriitilisi ilmakaari (vt ptk 3.3, Tabel 2).

4.4.1 Krohvi külmumisohu analüüs

Tavalise fassaadikrohvi külmumisohu analüüsimiseks selgitati välja ajahetked, mil samaaegselt on krohvisüsteemi keskmise kihi temperatuur madalam kui -2 C° (kuna vee külmumine eraldab märkimisväärses koguses faasimuutuse energiat ning 0 C° pinnatemperatuuri juures ulatuslikku külmumist veel ei toimu) ning krohvi niiskussisaldus on suurem kui 30% küllastusniiskusest (Joonis 35). Erinevad niiskuskooormused (ehitusniiskus, krohvi taha sattuv kaldvihm, siseruumi niiskuskooormused) mõjutavad krohvi külmumisohtu võrdlemisi vähe. Samuti mõjutab külmumisohtu üsna vähe soojustusmaterjali tüüp. Kuigi mineraalvilla puhul on krohv üldiselt tunduvalt niiskem (vt Joonis 35 perioodi jaanuar kuni aprill, niiskustaseme $0,005 \text{ m}^3/\text{m}^3$ esinemise sagedust), siis kriitilist külmumiskiiri ületavad punktid on ikkagi samas kohas ning sarnaste väärtustega. Villa puhul on maksimaalsed niiskused isegi madalamad, kuna läbi mineraalvilla difundeerub ekstreemses olukorras kaldvihmaga fassaadile sadanud niiskus kiiremini edasi seinä sisemistesse kihtidesse. Seega külmumisoht on seotud ennekõike ekstreemsete väliskliima tingimustega.

Analüüsides erinevaid niiskusarvutuste testaastaid Põhja-Euroopast, on näha et Väike-Maarja, Vantaa ja Potsdami fassaadidel on üsna sarnane külmakahjustuste risk (Tabel 6). Tugevalt tõusevad esile Norra linnad Bergen ja Trondheim. Trondheimis on kõrgendatud külmakahjustuse riskiga tunde 3 korda rohkem kui Väike-Maarjas. Tegemist on ka kõige põhjapoolseima uuritud asukohaga. Kuigi Bergenis on kriitilise ilmakaare kaldvihmakooormus kaks korda suurem kui Trondheimis, avaldab Atlandi ookean Bergenis õhutemperatuuridele nii palju pehmendavat mõju, et fassaad külmub harva ning sedagi kuivana.



Joonis 35. Väike-Maarjas asuva edelasuunalise EPS soojustusega raudbetoonist seina (üleva) ja mineraalvillast soojustusega kergbetoonist seina (all) fassaadikrohvi niiskussisaldused esimesel arvutusaastal. Niiskussisaldused kõrgemate temperatuuride juures kui -2C° on võrdsustatud nulliga, kuna sel juhul on külmumisoht madal.

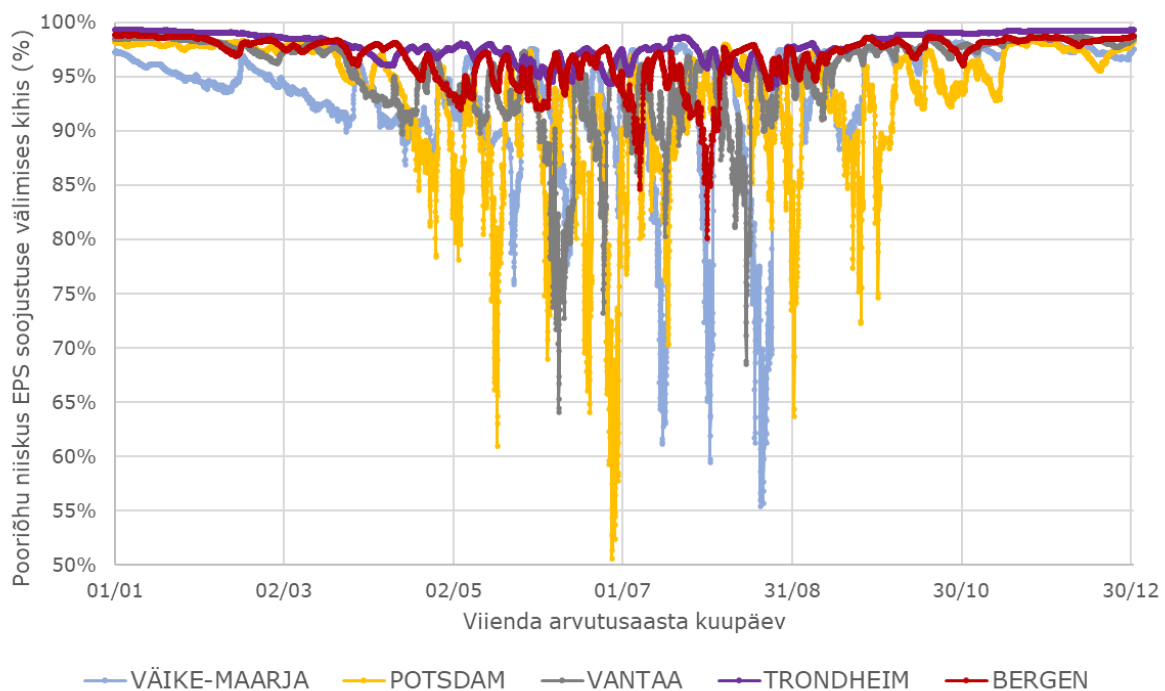
Tabel 6. Krohvi külmumisohuga perioodi pikkus erinevates kliimapiirkondades kõrge betooni algniiskuse ($0,11\text{m}^3/\text{m}^3$) ja 1% fassaadikrohvi taha sattuva kaldvihma koormuse korral.

Niiskuservutuse testaasta asukoht	Tunde aastas, mil külmumisoht esineb (h)	Kui suurel osal ajast esineb külmumise oht
1 Väike-Maarja, Eesti	78,8	0,90%
2 Bergen, Norra	0	0%
3 Trondheim, Norra	264,8	3,02%
4 Potsdam, Saksamaa	79,6	0,91%
5 Vantaa, Soome	67,0	0,76%

4.4.2 Krohvi taguse soojustuse niiskussisalduse sõltuvus väliskliimast

Kirjanduse andmetel asub Bergen sedavõrd intensiivse kaldvihmakooormusega piirkonnas, et SILS fassaadide ehitamine on ebaturvaline (Kvande et al., 2018). Suured niiskuskooormused on ka Trondheimis, kuigi aastane kaldvihmakooormus jääb kriitilisest piirist siiski allapoole. Väike-Maarjas, Vantaas ja Potsdamis on kaldvihmakooormused kordades väiksemad ning SILS fassaadid on laialt levinud (vt ptk 3.3, Tabel 2). Tõmbamaks paralleele päris seinte kahjustuste ulatuse ning Delphini mudeli arvutustulemuste vahel, võrreldi nende asukohtade niiskussisaldusi soojustuse kihis. Soojustuse välimise kihi võrdlus on eelistatud, kuna seal on niiskuse tasemed võrreldes krohviga stabiilsemad ning sademete ja päikese lühiajalised mõjud ei kõiguta niiskussisalduse graafikuid nii intensiivselt.

Võrreldes kõrgema kaldvihma koormusega piirkondi (Trondheim ja Bergen) keskmiste sademekoormustega piirkondadega (Väike-Maarja, Vantaa, Potsdam), tõuseb esile et Trondheimis ja Bergenis ei saa isegi suvel seina välimised kihid korralikult välja kuivada (Lisa 9 ja Joonis 36). Suure üldistusena võib öelda, et kui Väike-Maarjas, Vantaas ja Potsdamis on fassaadi jaoks niiskuslikus mõttes kaks aastaaega – soe ja kõikuva niiskusega ning niiske ja jahe, siis Norra lääneranniku linnades on sein aasta läbi niiske.

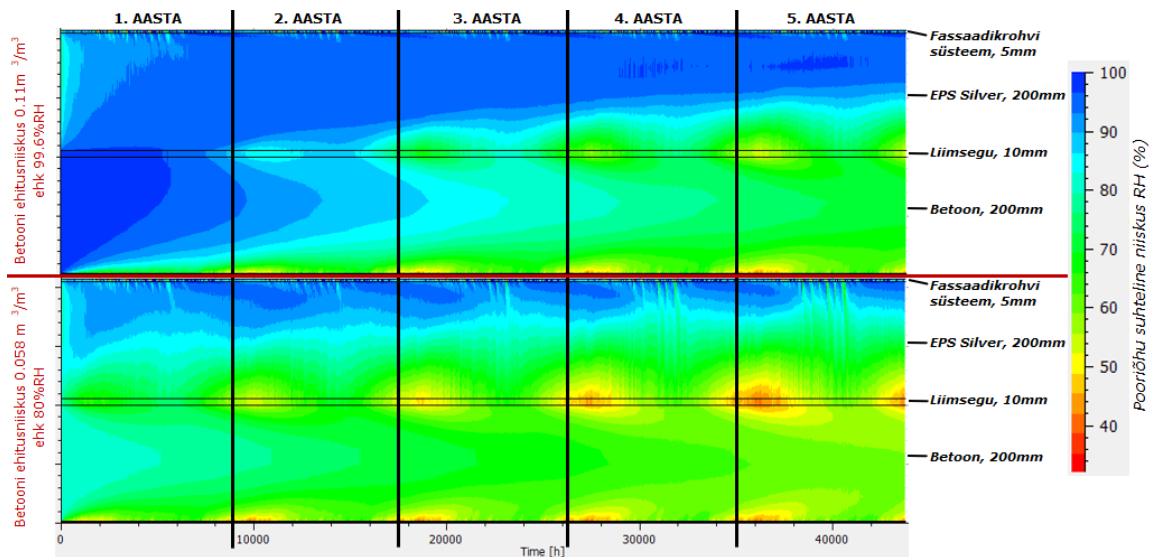


Joonis 36. EPS soojustusega SILS edelafassaadi viie aastase arvutuse viimase aasta niiskussisaldused soojustuse välimises kihis viie erineva kliimapiirkonna jaoks.

4.4.3 Erinevate niiskuskoormuste mõju

Kui võrrelda olukorda, kus raudbetoonist kandekonstruktsiooni algniiskus on $0,11\text{m}^3/\text{m}^3$ (Pihelo, 2020) 80% RH-le vastava algniiskusega ($0,058\text{m}^3/\text{m}^3$) (Joonis 37), siis on näha et betooni niiskus kuivab EPS soojustuse korral suuremas osas välja sisekeskkonna poole. Väljapoole kuivav niiskus aga ei mõjuta suurel määral kõige välimisi seinakihte, mis on pidevalt väliste kliimakoormuste mõju all. Vaadates Joonis 37 EPS soojustuse ja fassaadikrohvi ülemineku joont, on niiskuse tase igal ajahetkel üsna sarnane. Läbi EPS-i välja kuivav betooni algniiskus liigub läbi krohvi väliskeskkonda kiiremini kui teda läbi EPS-i kihi juurde tuleb.

Krohvi taha sattuva kaldvihma mõju on suhteliselt väike, kui jagada kogu kaldvihma koormus ühtlaselt fassaadikrohvi taha ära. Suuremad erinevused ilmnevad siis, kui rakendada suurema seina pinna kaldvihma koormus ühele kitsale alale (krohvis oleva prao kohale).



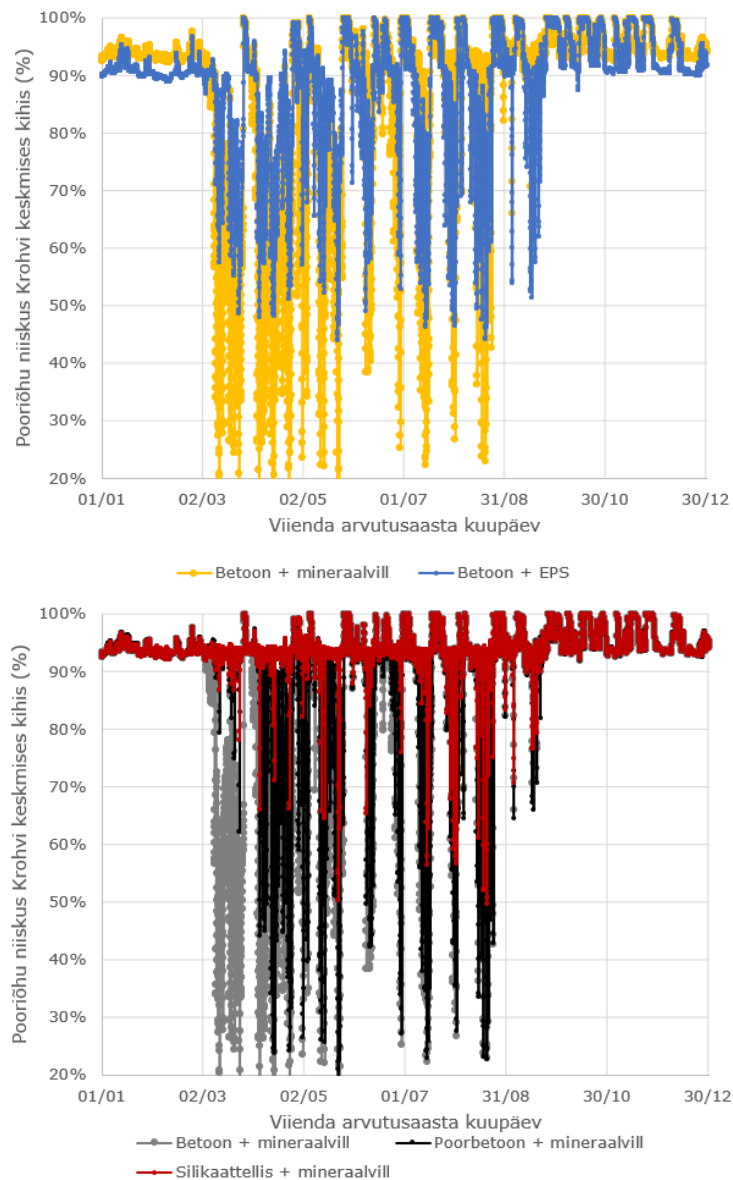
Joonis 37. Erinevate betooni algniiskuste mõju Väike-Maarjas asuva edelafassaadi suhtelistele niiskustele EPS soojustuse korral.

4.4.2 Erinevate konstruktsiooni ja soojustusmaterjalide mõju

Krohvisüsteemi niiskussisaldus sõltub ka sellest, millist soojustusmaterjali on seinas kasutatud ning milline on kandekonstruktsioon. Allolevates arvutustes on poorbetooni ehitusniiskuseks sarnaselt betoonile võetud 0,11 m³/m³, mis vastab 98,9% RH-le. Kliimatingimused olid iga arvutusolukorra juures samasugused ning vastavad Väike-Maarja edelafassaadile. Selgelt eristuvad EPS soojustusega ning mineraalvillast soojustusega olukorrad (vt Lisa 10 ja Joonis 38). Mineraalvillaga lahendus tähendab krohvi jaoks suuremaid niiskussisalduse kõikumisi ning talvisel (ja samal ajal väheste sademetega) perioodil kõrgemaid niiskussisaldusi, kuna ehitusniiskus ja siseruumi niiskuslisa pääsevad kiiremini läbi veeauru difusioonile avatud soojustuse ning niiskus koguneb krohvisüsteemi taha. Seega saab väita et krohvisüsteemi niiskussisalduse mõttes on turvalisem lahendus EPS soojustus.

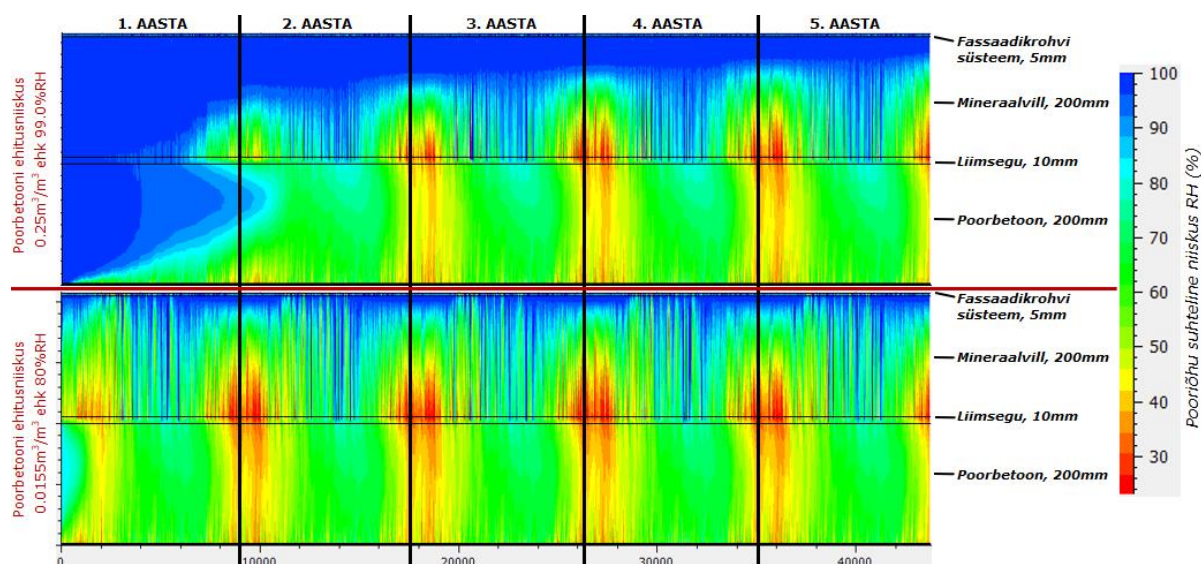
Võrreldes raudbetooni ning poorbetooniga lahendusi, on näha et poorbetooniga lahendused annavad kõrgemaid krohvi niiskussisaldusi, kuna tarindisse pääseb rohkem siseruumi niiskust. Samuti on poorbetooni võimalik mahuline algniiskus kõrgem.

Seega on krohvisüsteemi jaoks kõige riskantsem materjalide kombinatsioon poorbetoon + mineraalvill ning kõige turvalisem lahendus on raudbetoon + EPS soojustus.



Joonis 38. Väike-Maarjas asuva SILS edelafassaadi krohvi pooriõhu suhtelised niiskused sõltuvalt erinevast soojustusmaterjalist (ülevaht) ning erinevast konstruktsioonimaterjalist (all).

Analüüsid viie aastase arvutuse tulemusi mineraalvillaga soojustatud poorbetoon seina jaoks (Joonis 39), on näha et mineraalvilla puhul toimub ehitusniiskuse välja kuivamine palju kiiremini kui EPS soojustuse korral, mis tekitab tarindi välimistes kihtides juba esimesel talvel kõrged niiskussisaldused. Hiljem jõuavad kaldvihma poolt põhjustatud välimiste kihtide niiskumised kiiremini konstruktsiooni sisse. Samas on tarindi sisemised kihid tunduvat kuivemad kui EPS soojustuse puhul. Niiskuse kiirem liikumine soojustuse kihis võib anda eelise ka olukorras, kus paigaldame aktiivelementide piirkonnas soojustuse välispinnale veeaurutiheda kihi.



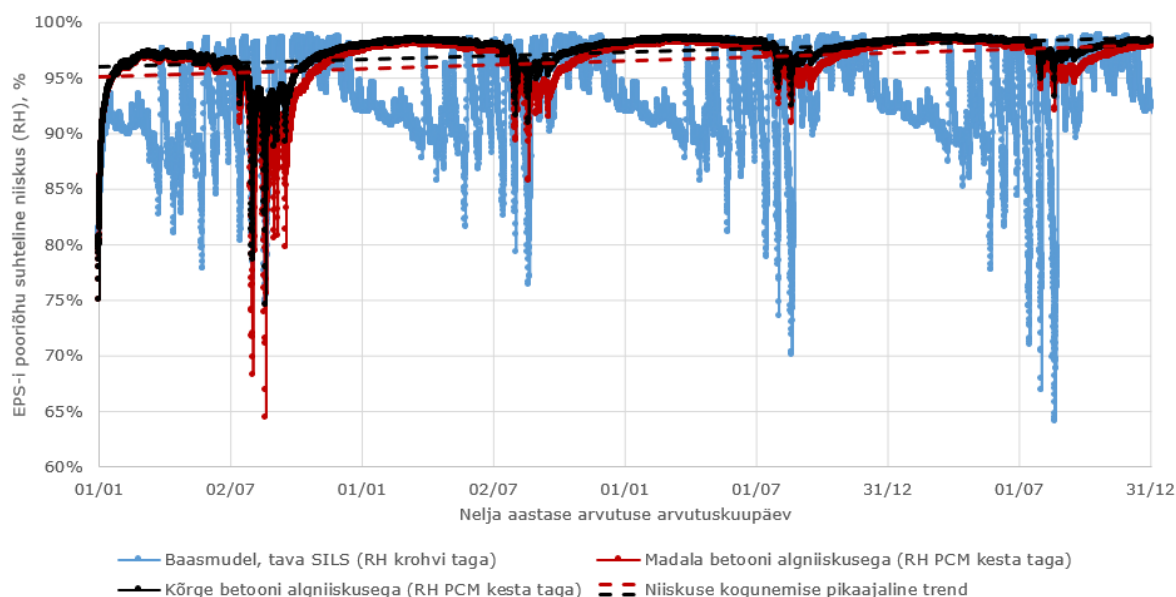
Joonis 39. Erinevate poorbetooni algniiskuste mõju Väike-Maarjas asuva edelafassaadi suhtelistele niiskustele mineraalvillast soojustuse korral.

4.5 Roostevabast terasest PCM kapsliga aktiivelementide niiskuslik toimivus

4.5.1 Soojustusmaterjali niiskussisalduse analüüs. Ehitusniiskuse mõju

PCM+PV elemendiga tarindi niiskustehnilise toimivuse hindamiseks võrreldi seda ilma täiendavate niiskukoormusteta seinakonstruktsiooni ehk baasmudeli niiskusliku toimivusega. PCM kesta taga, fassaadikrohvist kõige kaugemal asuv mõõtepunkt asus EPS soojustuse kihis ning EPSi suhteline niiskus selles punktis võimaldab hinnata kas niiskus hakkab teraskesta taha akumuldeeruma või mitte.

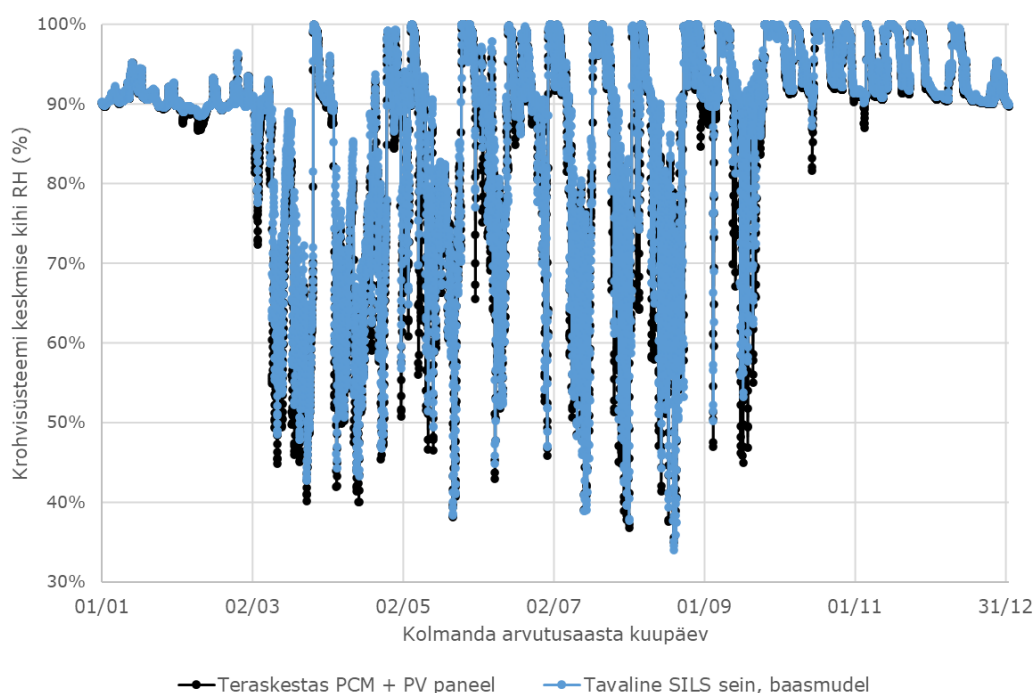
Nelja-aastase arvutuse tulemuste põhjal ilmnes, et kui baasmudeli puhul aasta-aastalt soojustuses olev niiskuse kogus samadel ajahetkedel väheneb, siis veeaurutiheda PCM kesta taga kipub see kasvama (Joonis 40).



Joonis 40. Väike-Maarjas asuva SILS edelifassaadi EPS soojustuse pooriõhu suhtelised niiskused PCM-PV osa keskel. Madala betooni algniiskusega (80% RH) tava SILS seina baasmudelit on võrreldud kõrge ($0,11\text{m}^3/\text{m}^3$) ning madala algniiskusega terasest PCM kestaga lahendusega. Ehitusniiskus kõrgendab märgatavalt soojustuse niiskussisaldust, kuid niiskuse akumulierimise trend on märgatav ehitusniiskusest sõltumata.

Samas on oluline ka märkida, et metallist kesta taga olev soojustusmaterjal on suhteliselt külmakindel ning vastupidav ka orgaanilistele mõjudele. Oluline niiskuse poolt tekitatav kahju on vaid soojustuse soojuslähivuse suurenemine, mida on tarindite soojuslähivuse arvutustes ka arvesse võetud (vt ptk 4.2 ja Tabel 5).

Seetõttu tuleks ennekõike uurida mõju, mida PCM kesta tagant välja kuivav niiskus avaldab krohvisüsteemile. Selgus, et fassaadikrohvi niiskussisaldused muutusid võrreldes baasmudeliga suhteliselt vähe ning krohvisüsteemi terve aasta keskmine suhteline niiskus oli PCM kestaga lahenduse puhul isegi madalam kui baasmudelil (Joonis 41). Erinevus ilmneb päikesepaistelisel perioodidel ning seda saab selgitada PV tumeda, kiirgust neelava pinna mõjuga. PV paneel ning ka PCM kapsel soojenevad ning see soojus antakse edasi krohvisüsteemile, mille niiskus siis PV paneeli poolsest osast intensiivsemalt välja aurustub.

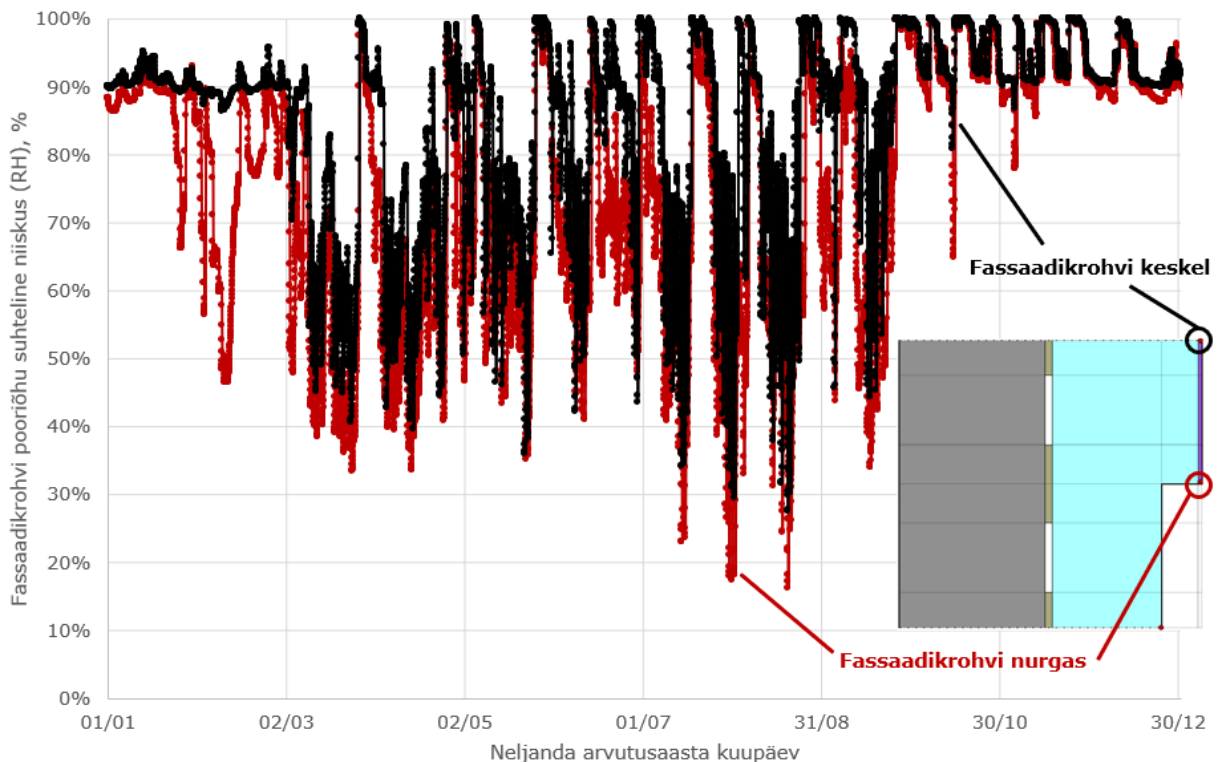


Joonis 41. Teraskesta sisse kapseldatud faasimuutusmaterjaliga lahenduse ning tavalise SILS seina fassaadikrohvide suhtelise niiskuse võrdlus. Mõlemas arvutusmudelil on EPS soojustus ning kõrge ($0,11 \text{ m}^3/\text{m}^3$) betooni niiskussisaldus. 1% kaldvihma koormusest on rakendatud läbi prao krohvi kihi taha ühes kontsentreeritud kohast (vt ptk 3.4.7. Joonis 26).

Uurides lähemalt ehitusniiskuse välja kuivamist seinast (vt Lisa 11) on näha et pool betooni ehitusniiskusest kuivab välja sissepoole, pool väljapoole. Väljapoole kuivav niiskus koguneb veeaurutiheda PCM kesta taha, soojustuse kihti. Siiski ei mõjuta ehitusniiskus väga suurel määral SILS seina välimisi kihte. Krohvisüsteemi mõjutavad ennekõike väliskliima koormused.

4.5.2 Fassaadikrohvi ebaühtlane niiskussisaldus

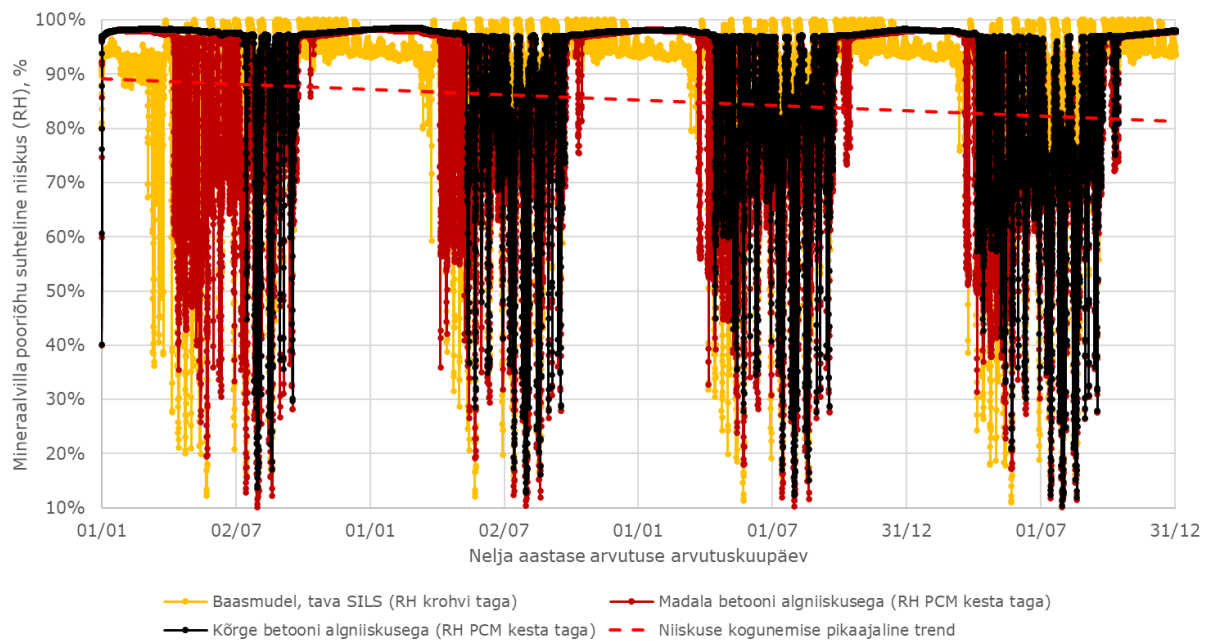
Kui kõrvale jätta lokaalne läbiva kaldvihma mõju vabalt valitud prao asukohas, siis asub fassaadikrohvi niiskuslikult kõige kriitilisem punkt fassaadikrohvi pinna keskel, mitte PV paneeli ja krohvi üleminekupiiril (vt Lisa 11 ja Joonis 42). Kuna PV paneeli pind on tume, soojeneb paneel palju intensiivsemalt kui hele krohvipind. Faasimuutusmaterjal hoiab aktiivelemendi piirkonna soojemana ka öhtul, mistõttu saab krohvi PV-paneeli poolne serv paremini välja kuivada. Lisaks alandab kõrgem temperatuur ka pooriõhu suhtelist niiskust, kuid erinevused on nähtavad ka krohvi niiskussisalduste võrdluses. Teine põhjus, miks nurk ei ole niiskuse mõttes kriitiline, on see et nii siseruumi niiskuslisa kui väljapoole kuivav ehitusniiskus liiguvad PCM kesta tagant külje peale ning krohvi nurgast nõ. kaarega mööda.



Joonis 42. Väike-Maarjas asuva SILS edelifassaadi krohvisüsteemi pooriõhu suhtelised niiskused. PV paneeliga külgnevas nurgas on krohv vähem niiske kui keset krohvitud pinda.

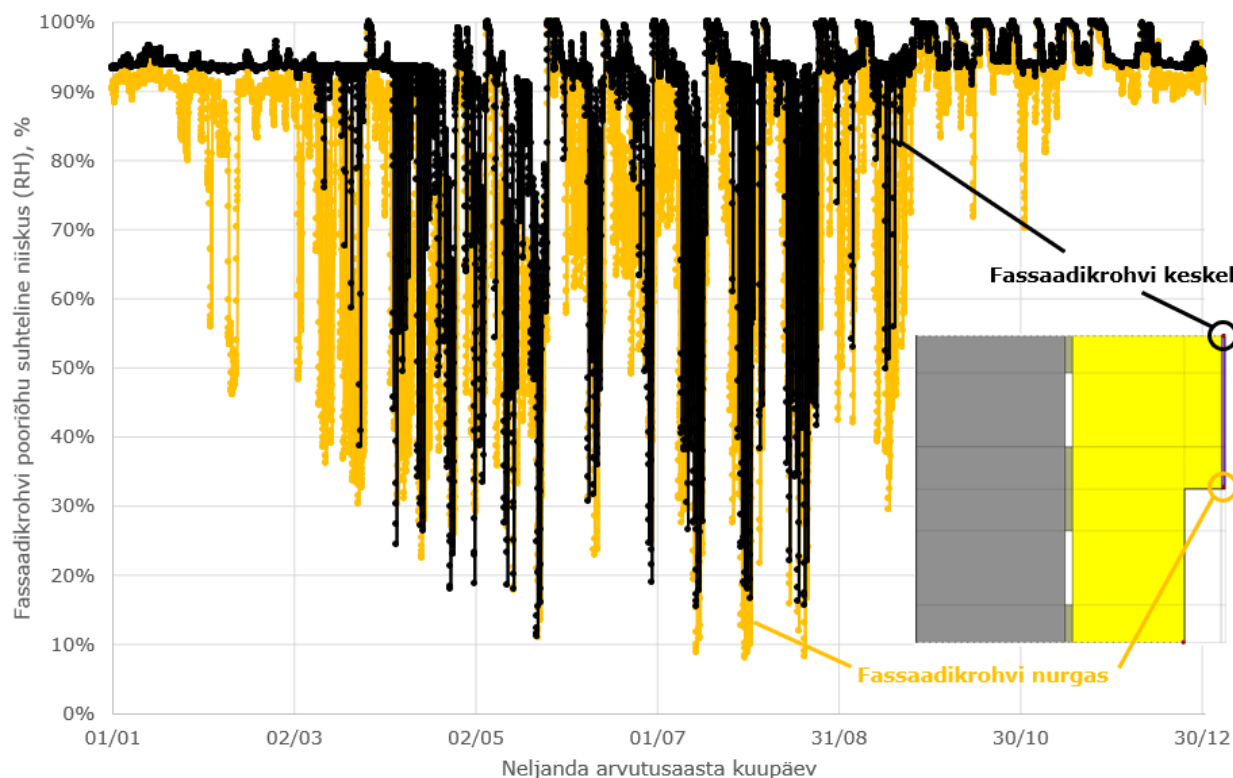
4.5.2 Erinevate soojustusmaterjalide mõju

Analüüsidest metallkesta kapseldatud PCM-iga lahendust, kus EPS soojustuse asemel on soojustuseks mineraalvill, näeme et veeaurutiheda kihi taga on mineraalvilla niiskusrežiim palju ebaühtlasem kui EPS soojustuse korral (Joonis 43). Kuid siiski ei saavuta vill PCM kapsli taga nii kõrgeid niiskussisaldusi nagu vahetult fassaadikrohviga taga. Nelja aasta perspektiivis kuivab mineraalvillaga lahenduse ehitusniiskus kiiremini välja kui EPS lahenduse puhul. Üldjoontes on aga teraskesta näol tegemist toimiva lahenduse nii EPS kui mineraalvillast soojustuse korral.



Joonis 43. Väike-Maarjas asuva SILS edelafassaadi mineraalvillast soojustuse pooriõhu suhtelised niiskused PCM-PV osa keskel. Madala betooni algniiskusega (80% RH) tava SILS seina baasmudelit on võrreldud kõrge ($0,11\text{m}^3/\text{m}^3$) ning madala (80% RH) algniiskusega terasest PCM kestaga lahendusega.

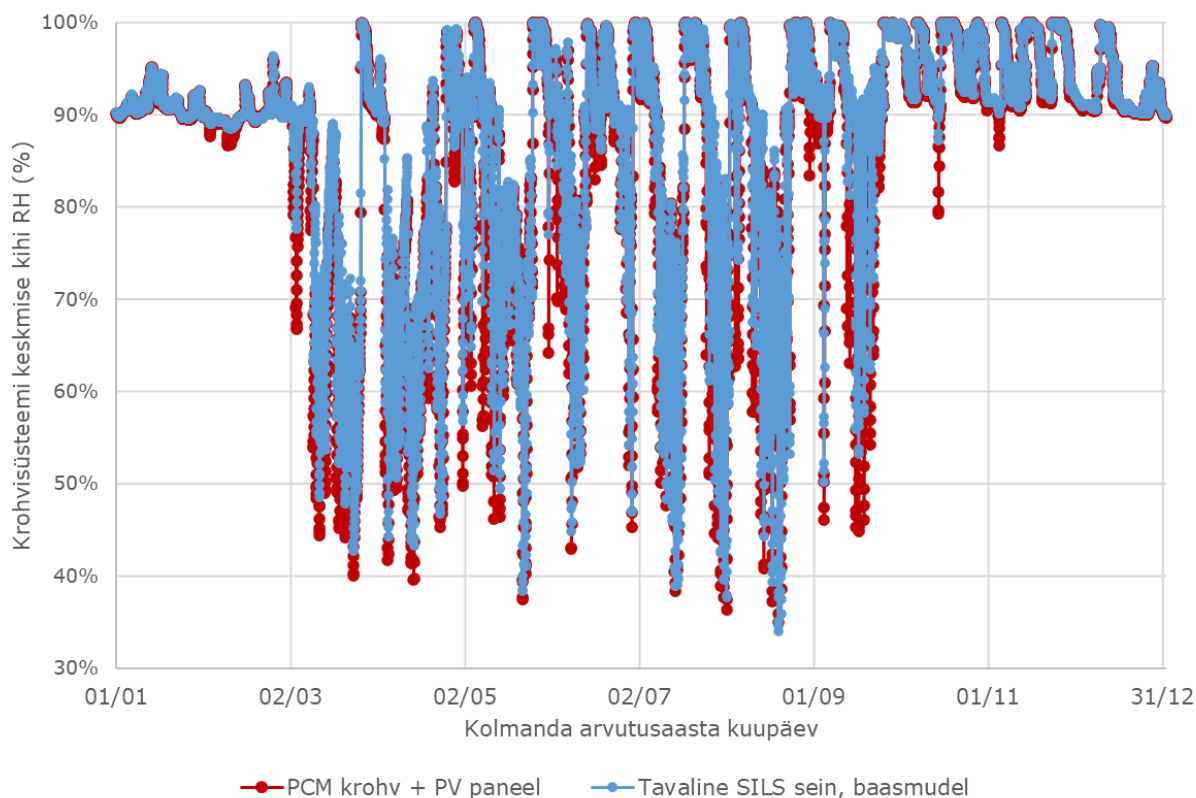
Fassaadikrohvi nurgas ning krohvitud ala keskel on krohvi niiskussisalduste vahe mineraalvilla puhul veelgi suurem kui oli see erinevus EPS-i puhul (Joonis 44). Põhjuseks on ilmselt see, et PV paneeli ümbruse soojenemise tõttu võimaldab vill liikuda niiskusel päikeselisel ajal ka sügavamale seina sisse, samas kui EPS-iga lahendus suunas krohvi pigem väljapoole kuivama.



Joonis 44. Väike-Maarjas asuva mineraalvillaga soojustatud SILS edelifassaadi krohvisüsteemi pooriõhu suhtelised niiskused. PV paneeliga külgnevas nurgas on krohv vähem niiske kui keset krohvitud pinda.

4.6 Krohvi sisse kapseldatud PCM graanulitega lahenduse niiskuslik toimivus.

Sarnaselt teraskesta sisse kapseldatud PCM lahendusele ei mõjuta ka krohviga segatud PCM graanulite kasutamine suuremal määral tavalise fassaadikrohvi niiskussisaldust (Joonis 45). Ainus erinevus on taaskord see, et PV paneeli neelatav soojus aitab krohvisüsteemi rohkem välja kuivatada soojadel ajaperioodidel.



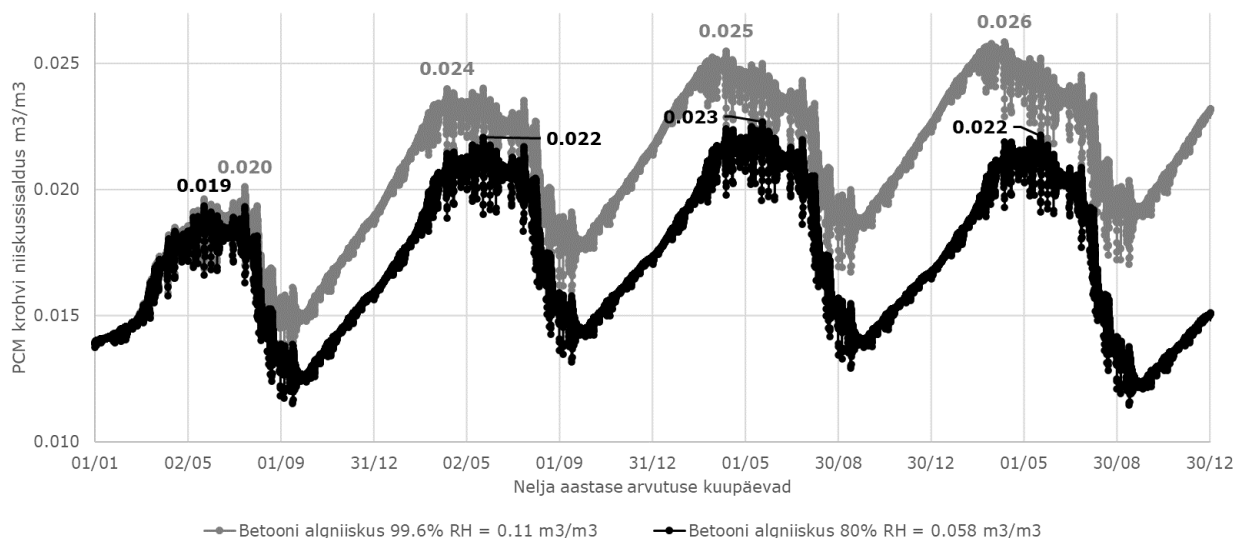
Joonis 45. Krohvi sisse segatud PCM graanulitega lahenduse ning tavalise SILS seina fassaadikrohvide suhtelise niiskuse võrdlus. Mõlemas arvutusmodelis on EPS soojustus, kõrge betooni niiskussisaldus ning 1% kaldvihmakoormusest on rakendatud läbi prao krohvi kihi taha ühes kontsentreeritud kohast.

Seega võiks olla tavalise SILS fassaadiosa mõttes PCM krohvi kasutamine aktsepteeritav lahendus. Ennekoike on küsimus selles, kuidas saab paksust krohvikihist niiskus külgedele liikuda ning kas eksisteerib PCM krohvi külmumise oht.

4.6.1 PCM krohvi külmumisohu analüüs

Külmumisohu analüüsimiseks kasutame laboris mõõdetud tsementkrohvi poorsust $0,14 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ning kriitiliseks külmumispiiriks eeldame 30% sellest ehk $0,042 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Ühegi varasemalt analüüsitud niiskukoormuste kombinatsiooniga aga sellist niiskust saavutada ei õnnestunud.

PCM graanulitega segatud krohvi puhul on oluline uurida mitme aasta jooksul niiskuse akumulierumist krohvi sees (Joonis 46). See näitab kõige paremini, kas sisemised niiskukoormused pääsevad välja kuivama või mitte.



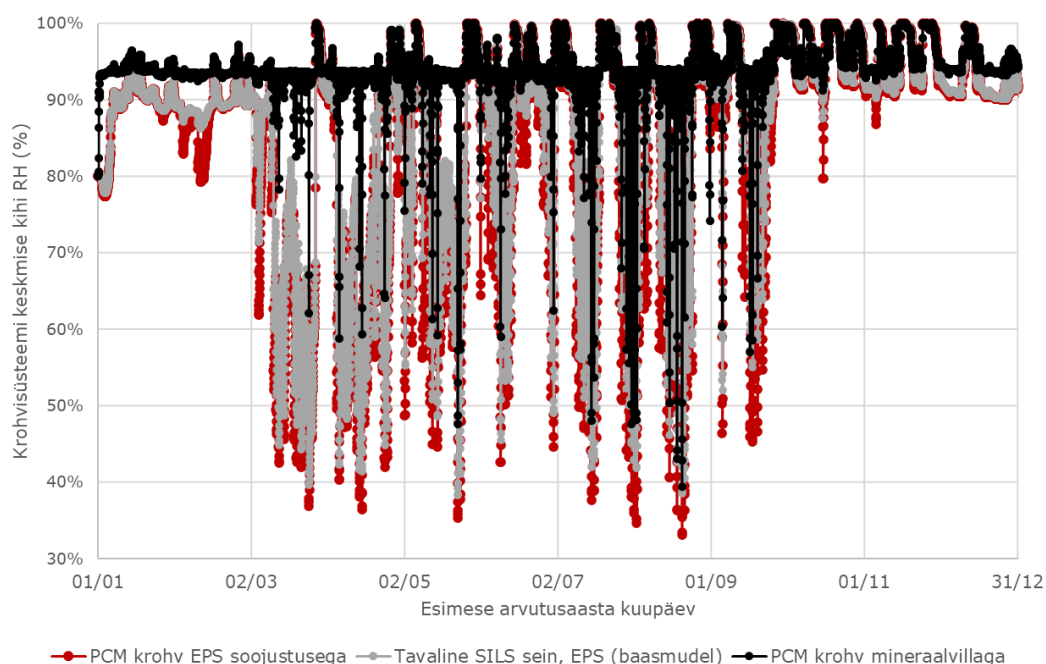
Joonis 46. PCM krohvi välimise kihi niiskussisaldus fassaadikrohvist kõige kaugemas punktis erinevate betoonkonstruktsiooni algniiskuste juures.

Vaadeldes lähemalt ehitusniiskuse välja kuivamist nelja arvutusaasta vältel (vt Lisa 13), näeme et niiskus koguneb veeaurutiheda PV paneeli taha, PCM krohvi kihti. Siiski ei ole antud materjali omaduste puhul krohvi niiskussisaldus nii suur et põhjustada külmakahjustusi. Kuivade ilmadega väheneb ka kõige kaugemas punktis PCM krohvi niiskussisaldus, mistõttu võiks EPS soojustusega olla selline PCM-i kapselduse lahendus printsibiis toimiv.

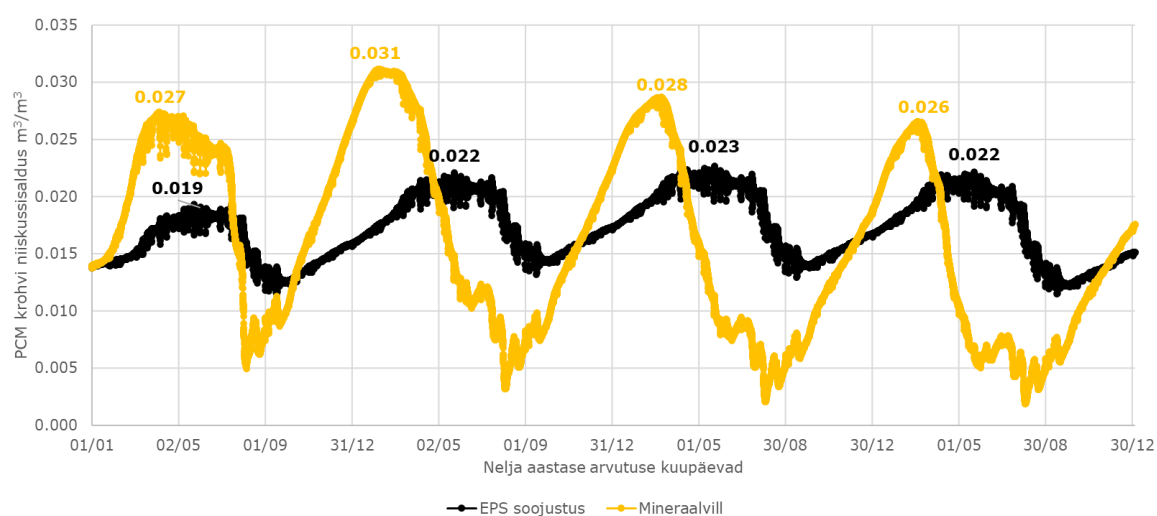
4.6.2 Erinevate soojustusmaterjalide mõju

Nii fassaadikrohvi kui ka PCM krohvi niiskussisaldust mõjutab ka soojustusmaterjali valik. Seda eriti arvutusperioodi alguses, mil mineraalvillaga lahenduse puhul betooni ehitusniiskus palju kiiremini krohvi sisse liigub. Seetõttu on fassaadikrohv villaga lahenduse puhul tunduvalt niiskem kui EPS soojustuse puhul (Joonis 47).

PCM krohvi niiskusrežiim on fassaadikrohvi omast ühtlasem ning EPS-i ja mineraalvilla erinevused tulevad veelgi selgemini esile (Joonis 48). Mineraalvillast soojustus suurendab jahedal ajal PCM krohvi niiskussisaldust, kuid suvel kuivab krohv paremini välja. EPS soojustusega on PCM krohvi niiskusrežiim stabiilsem. PCM krohvi aasta keskmine niiskussisaldus on suhteliselt sarnane.



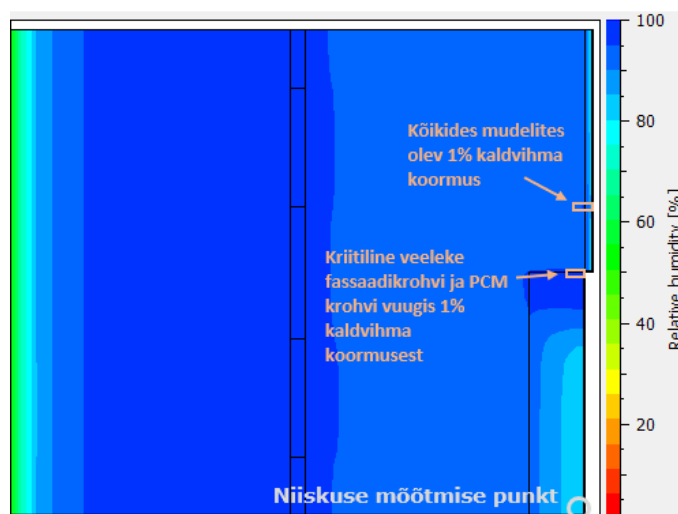
Joonis 47. PCM krohviga lahenduse puhul tava SILS seiniosa fassaadikrohvi keskmise punkti suhteline niiskus erinevate soojustusmaterjalide puhul. Mineraalvillaga on krohvi niiskus tunduvalt kõrgem kui EPS soojustusega.



Joonis 48. PCM krohviga lahenduse puhul PCM krohvi niiskussisaldus PV paneeli taga. Mõlemas mudelis olid betooni ehitusniiskus $0,11 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ning fassaadikrohvi läbiv veeleke.

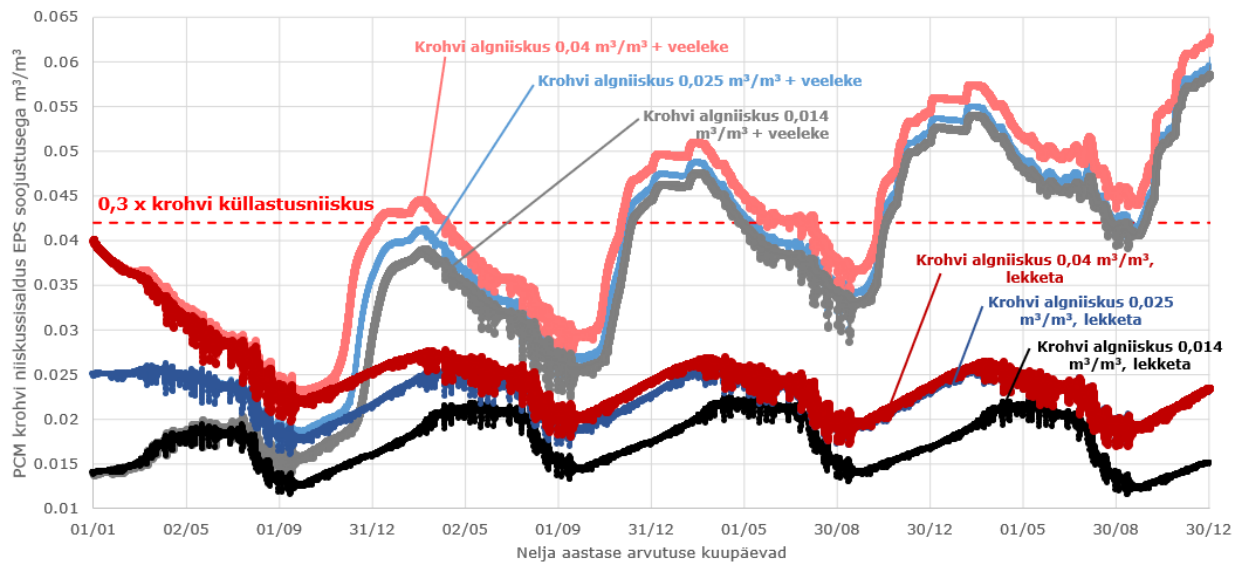
4.6.3 PV paneeli ja fassaadikrohvi vahelise veelekke mõju PCM krohvi külmakindlusele

Olukord muutub aga suuresti, kui lisada mudelisse veel üks täiendav kaldvihma leke fassaadikrohvi ning PCM krohvi liitekohta. Sealt valgub niiskus PCM krohvi sisse ning aja jooksul tekib niiskuse akumulereerumise efekt. Kui fassaadikrohvis olev 1mm laiune pragu kogu konstruktsiooni väga suurel määral ei mõjuta, siis PCM krohvi ja tavalise fassaadikrohvi vahel olev 1mm laiune pragu (Joonis 49) võib põhjustada PCM krohvi lagunemise külmal perioodil (Joonis 50).



Joonis 49. PCM krohvi ja fassaadikrohvi liitekohas kriitilise veelekke mõju tarindi niiskussisaldusele. Fassaadikrohvi prao ümbruses on suhtelise niiskuse erinevused väiksemad kui PCM krohvi piiril oleva prao all. Mõlema arvutusliku prao laius arvutusmudelil on 1mm ja kaldvihma kogus on sama suur.

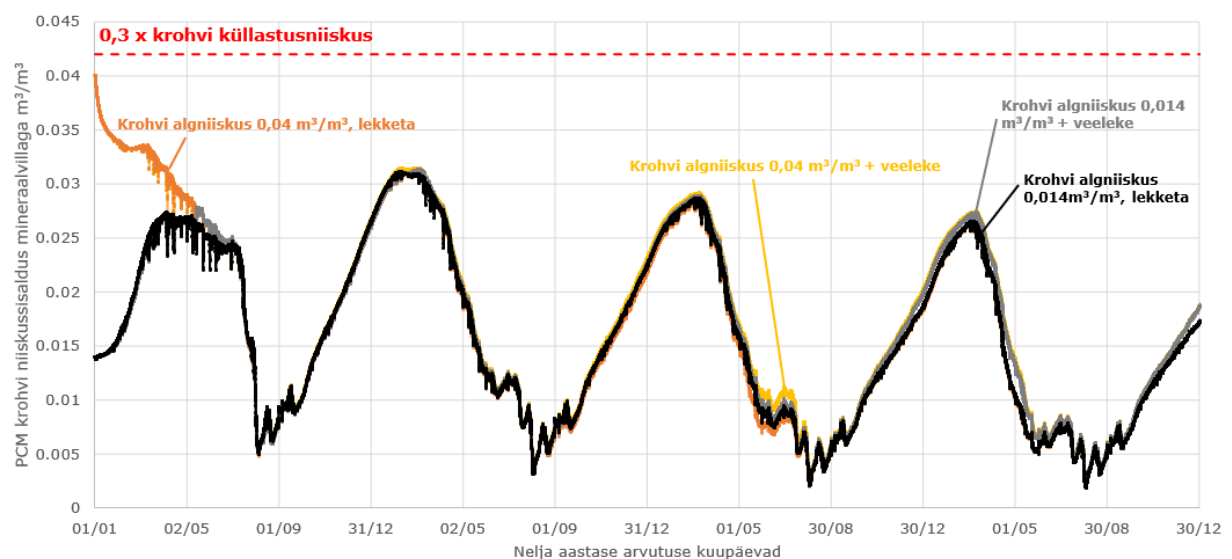
Arvutuste tulemusena selgus, et erinevad PCM krohvi algniiskused ei mõjuta niiskuse akumulereerumist (Joonis 50). Küll aga mõjutab tarindi toimivust fassaadikrohvi ja PV paneeli liitekohas olev pragu, mille kaudu vesi PCM krohvi sisse satub ning seejärel veeaurutiheda kihi taha lõksu jääb. Sõltumata PCM algniiskusest ületasid EPS soojustusega lahenduse puhul varem või hiljem kõik liitekohas veelekkega olukorrad lagunemiskriteeriumi. Erinevus oli vaid selles, et 0,04 m³/m³ krohvi algniiskuse korral hakkab krohv lagunema teisel talvel, 0,025 m³/m³ ja 0,014 m³/m³ algniiskuse korral kolmandal talvel. Seevastu, kui õnnestub vältida veelekkeid tavalise krohvitud fassaadi ja PV paneelide liitekohas, õnnestub PCM krohvi algniiskusest sõltumata pikaajalist niiskuse akumulereerumist vältida.



Joonis 50. PCM krohvi välimise kihi niiskussisaldus fassaadikrohvist kõige kaugemas punktis kriitilise veelekke olemasolul ning ilma. Kõigis mudelites on EPS soojustus, ja betooni algniiskus $0,11\text{m}^3/\text{m}^3$.

4.6.4 Erinevate soojustusmaterjalide mõju

Mudeldades analoogset seina mineraalvillast soojustusega erinevate PCM krohvi algniiskustega (Joonis 51), selgus et ei algniiskus ega ka kriitilise veelekke olemasolu ei muuda oluliselt vahetult PV paneeli taga olevat niiskuse kogust. Kuna mineraalvilla veeauru difusioonitakistustegur on niivõrd madal ($\mu=1$), siis liigub niiskus palju kiiremini veeaurutiheda kihi tagant välja. Sõltumata betooni algniiskusest, ühtlustub teise arvutusaasta alguseks kõikide arvutusolukordade puhul PCM krohvi niiskussisaldus. Niiskuse akumulereerumist samuti ei toimu kuna alates 3. arvutusaastast on PCM krohvi niiskussisaldus langustrendis.

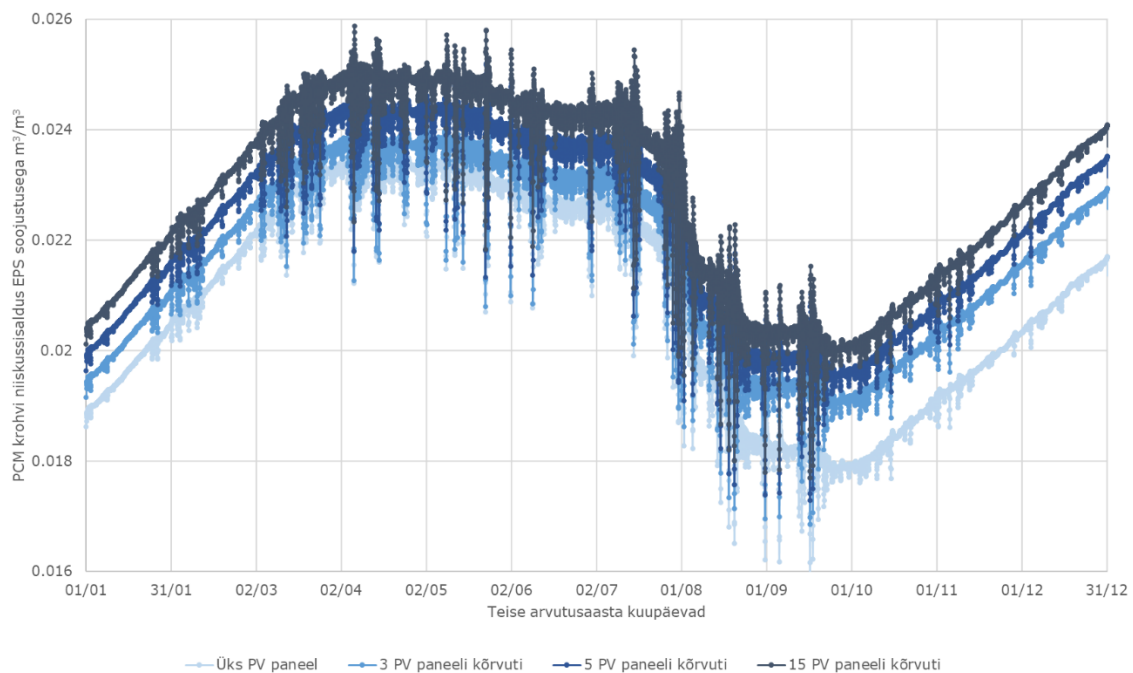


Joonis 51. PCM krohvi välimise kihi niiskussisaldus fassaadikrohvist kõige kaugemas punktis kriitilise veeleke olemasolul ning ilma. Kõigis mudelites on mineraalvillast soojustus, ja betooni algniiskus $0,11\text{m}^3/\text{m}^3$.

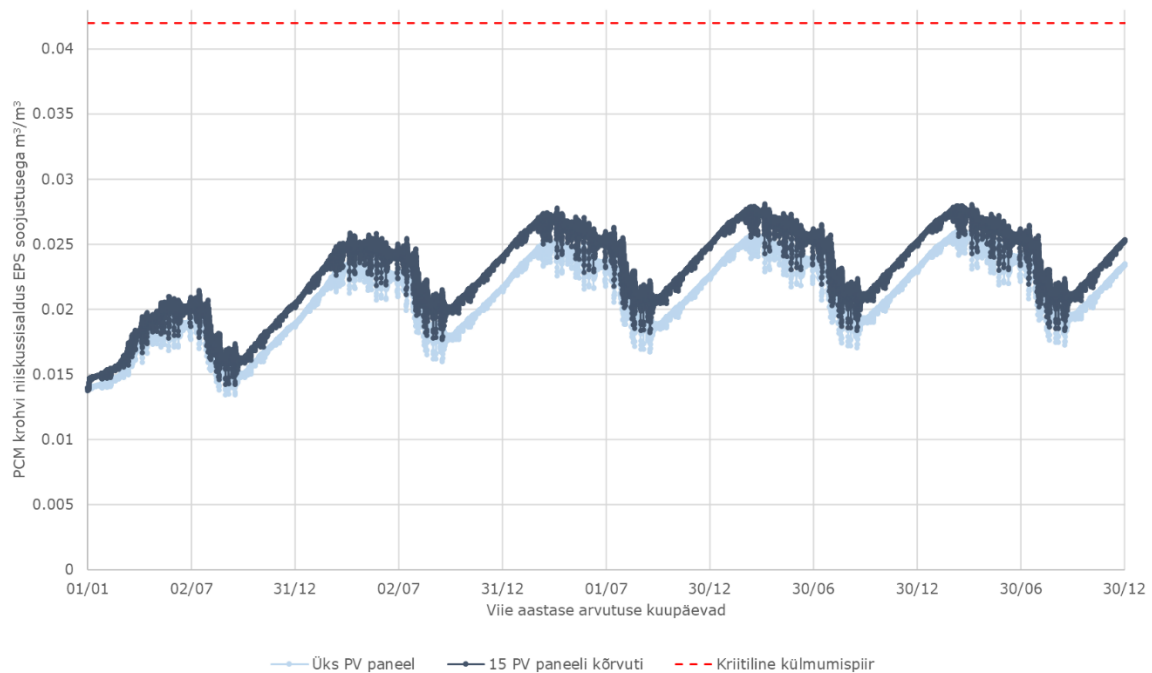
Seega võib väita et veelekete saatusliku mõju vältimiseks tasuks kaaluda PCM krohviga lahenduse puhul EPS soojustuse asemel mineraalvilla kasutamist.

4.6.5 Mitme PV paneeli kõrvuti paigaldamise mõju

Läbi arvutati ka mitme PV paneeli kõrvuti paigaldamise olukorrad ning üllatuslikult selgus et PV paneeli tagune PCM krohv on sedavõrd hea veejuhtivusega, et olukorras kus veeauru läbilaskva krohvi kihini jõudmise teekond pikeneb, et kaasne sellega suurt niiskustaseme kasvu või niiskuse akumulierimist (Joonis 52ja Joonis 53). Iga lisanduva paneeliga muutus küll PCM krohvi niiskussisaldus veidi suuremaks, kuid lagunemise piirini jõuda reaalsete paneelide arvuga ei õnnestunud. Seega võib väita et lagunemise põhjustab ikkagi pigem veeleke ning et PV paneelidega kaetud fassaadiosa laius ei ole väga rangelt piiratud.



Joonis 52. PCM krohvi välimise kihi niiskussisaldus fassaadikrohvist kõige kaugemas punktis juhul kui mudelis asetseb kõrvuti 1, 3, 5 ja 15 PV paneeli. Kõigis mudelites on EPS soojustus, ja betooni algniiskus $0,11\text{m}^3/\text{m}^3$.

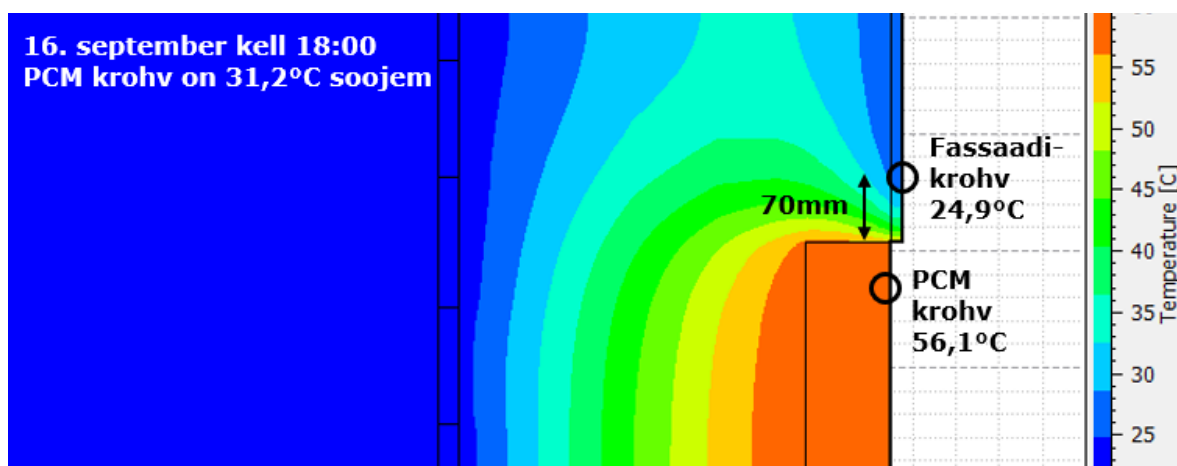


Joonis 53. Niiskuse tase PCM krohvi välimises kihis stabiliseerub kolmanda aasta tasemel ning ei ületa kriitilist piiri ei ühe ega 15 kõrvuti asetseva PV paneeli korral.

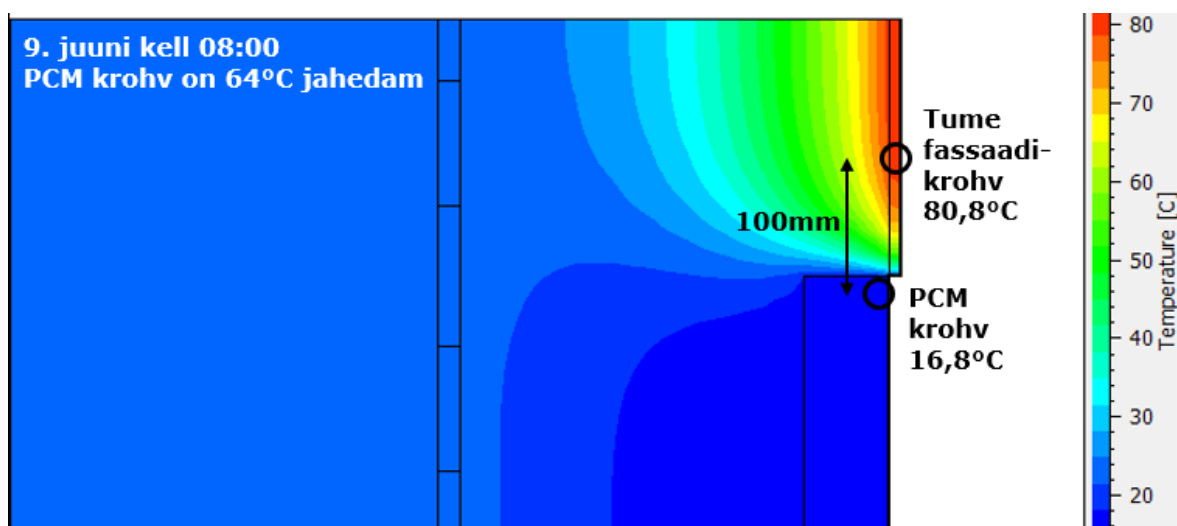
4.6.6 PV ja fassaadikrohvi vahelised temperatuuride erinevused

Kuna faasimuutusmaterjal puhverdab pinnatemperatuure, siis tekivad fassaadikrohvi ning faasimuutusmaterjaliga segatud krohvi ülemineku kohas suured temperatuuride erinevused. Eriti intensiivsed on need erinevused hommikul ja õhtul. Hommikul esimese päikese ajal on faasimuutusmaterjal jahedam kui fassaadikrohv ning õhtul päikese loojudes jahtub tunduvalt väiksema termilise massiga fassaadikrohv palju kiiremini kui PCM krohv, mis hakkab aeglaselt tahkeks muutuma (Joonis 54). Testaasta jooksul maksimaalne õhtune temperatuuride erinevus oli 31°C. Seevastu ida poole suunatud tumedat värvi (neelduvustegur $\Delta=0,8$) fassaadi temperatuuride erinevus päikeselisel ja tuulevaiksel suvehommikul oli lausa 64°C (Joonis 55).

Seetõttu on kindlasti vajalik fassaadikrohv eraldada PCM krohvist ning PV paneelist deformatsioonivuugiga. Fassaadikrohvist ühtlustuvad temperatuurid ca 70...100mm riba ulatuses, mis ümbritseks fassaadil PV paneele ristküliku kujulise tsoonina. Kõige ekstreemsemal ajahetkel langeb krohvi pinnatemperatuur piki krohvi PV paneelist eemale liikudes ca 0,5...1°C iga 1mm kohta, mis on väga järsk temperatuuride muutus. Seetõttu võib olla vajalik fassaadikrohv PCM krohvist ka soojuslikult isoleerida. Oluline on tulevikus täpsemalt uurida PV paneelide serva deformatsioonivuugi materjali soojuserijuhtivust. Samuti on olulised liitekohta elastsus ja ilmastikupüsivus.



Joonis 54. Fassaadikrohvi ja PCM krohvi temperatuuride erinevused kõige ekstreemsemal hilissuvisel öhtul edelakaare fassaadil. Kasutatud kliimafailis kadus otsene päikesekiirgus 16. septembril kell 17:00 ning ekstreemne olukord tekkis tund aega hiljem.

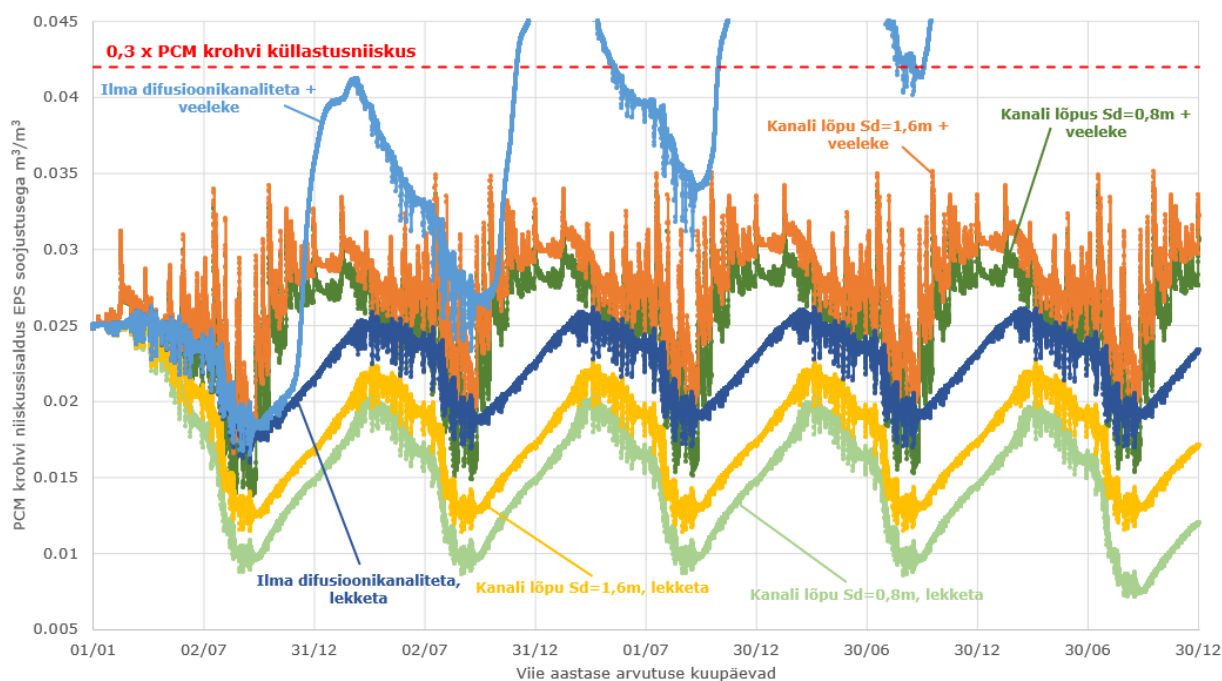


Joonis 55. Fassaadikrohvi ja PCM krohvi temperatuuride erinevused kevadhommikul tumeda idafassaadi puhul.

4.7 Difusioonikanalitega PCM krohvi niiskuslik toimivus

Kui eelnevalt käsitletud lahenduste puhul pääses niiskus välja kuivama vaid veeaurutiheda kihi tagant nõ külje peale välja kuivades, siis niiskustehniliselt ohutuma lahenduse saaks, kui kasutada difusioonikanaleid. Käesolevas peatükis on võrreldud nii ainult alt avatud ($S_d=1,6m$) kui ka ülevalt ja alt avatud ($S_d=0,8m$) kanalitega lahendust. Üks eelis võrreldes ilma difusioonikanaliteta lahenduse ees on see, et PV paneele on võimalik paigutada üksteise kõrvale, ilma et nende taga olev niiskuse kogus suureneks.

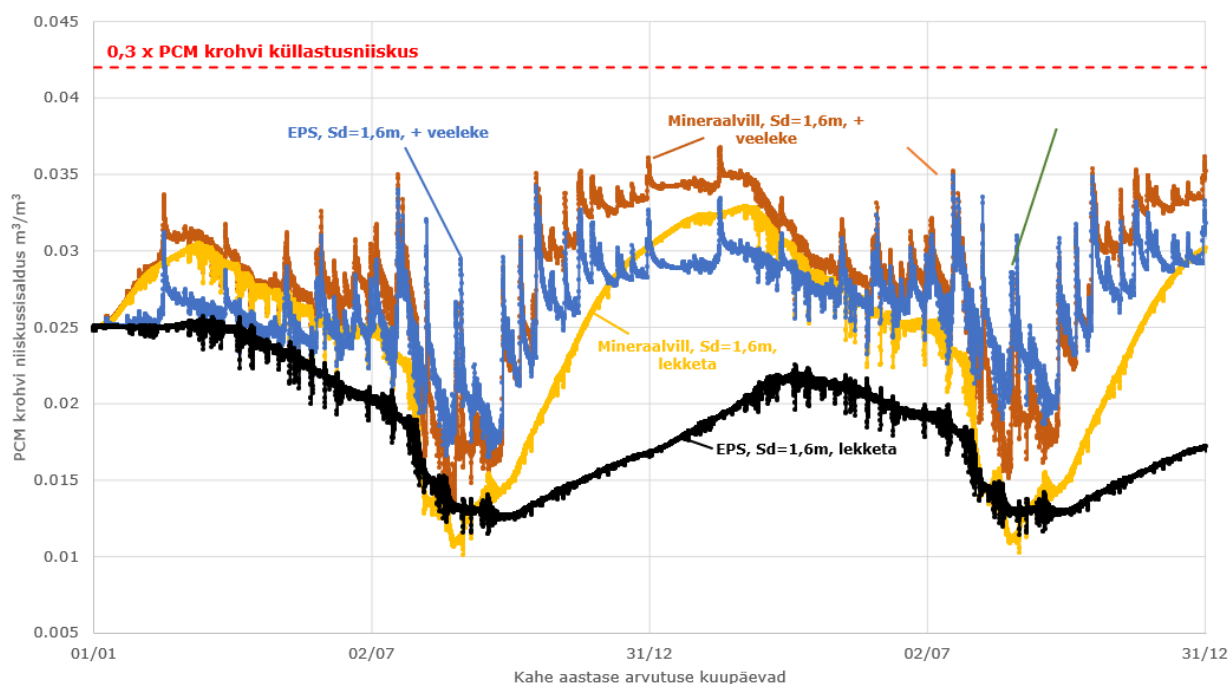
Võrreldes difusioonikanalitega lahendust ilma kanaliteta lahendusega on näha, et difusioonikanalid päästavad tarindi juhul kui esineb veelekkeid läbi PV paneeli ja fassaadikrohvi liitekohta pragude. Nagu näha Joonis 56, ei esine difusioonikanalitega lahenduse puhul niiskuse ulatuslikku akumulatsioonist sõltumatu sellest, kas veelekkeid esineb või mitte. Stabiliseerumiskiiskused on küll erinevad sõltuvalt difusioonikanali pikkusest, kuid niiskus ei ületa ühelgi juhul kriitilist külmumisniiskust. Reaalsuses peaks difusioonikanalitega lahendus veelgi paremini toimima, kuna antud juhul on 2D arvutuses käsitletud vaid kanalit kõige kaugemat punkti. Tegelikult on kanali otsa piirkonnas niiskusel oluliselt lihtsam välja kuivada ning ka kaugemates piirkondades toimib niiskuse välja kuivamine kolmanda dimensiooni suunas (sarnaselt ilma difusioonikanaliteta lahendusele). Lisaks ei arvestanud antud mudel niiskuse võimaliku väljumisega piki kanalit alla nõrguvate veetilkade abil ning mikrokonvektsiooni mõjuga.



Joonis 56. PCM krohvi niiskussisaldus erineva pikkusega difusioonikanalite korral kanali kõige kaugema punkti asukohas ning võrdlus ilma kanaliteta PCM krohvi lahendusega. Modelleeritud veelekkeid PV paneeli taga on sama suured. Igas mudelis on konstruktsioonikiht raudbetoon algniiskusega $0,11 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Soojustuseks on EPS.

Kuna difusioonikanalite pikkuse 1,6m ja 0,8m vahel ei ole väga suuri erinevuseid, siis võiks soovitada ehitustehniliselt lihtsamalt teostatavat lahendust, kus kanalid on avatud ainult PV paneeli alt. Kuna PV paneel astub mõned millimeetrid fassaadikrohvi pinnast tagasi, on see üleminek niikuiini tarvilik vormistada väikese tilgaplekiga (vt Lisa 2, Joonis 2.2.1). Pleki all või pleki ja PV paneeli vahel on võimalik ühendada difusioonikanalite otsad väliskeskkonnaga. Väga oluline on vältida sadevee konstruktsiooni sattumist pleki piirkonnas.

Ka difusioonikanalitega lahendust on võimalik teostada erinevate soojustusmaterjalidega. Joonis 57 on näha, et mineraalvilla puhul on PCM krohvi niiskussisalduse kõikumine tunduvalt suurem kui EPS soojustuse puhul. Samas on mõlema lahenduse korral krohvi niiskussisaldus kriitilisest külmumispiirist madalam ning ulatuslikku pikaajalist niiskuse akumulereerumist ei toimu.



Joonis 57. PCM krohvi niiskussisaldus difusioonikanalitega lahenduse puhul olukordades kus betoonsein (algniiskusega $0,11 \text{ m}^3/\text{m}^3$) on soojustatud mineraalvillaga või EPS-iga. Näha on ka veelekete mõju tulemustele. Näidatud on esimesed kaks aastat, kuna selle ajaga on ehitusniiskus välja kuivanud. Edaspidi niiskusrežiim stabiliseerub.

5. JÄRELDUSED JA EDASISTE UURINGUTE VAJADUS

Erinevaid variante PCM kapseldamise lahenduste, soojustus- ja kandekonstruksiooni materjalide ning erinevate ääretüüpide ja veelekete suuruse kombineerimiseks on võimalik kombineerida mitmeid. Käesolevas töös analüüsiti vaid olulisemaid muutujaid eesmärgiga mõista, millised tegurid energiaaktiveeritus SILS seinte niiskuse režiimi mõjutavad ning millised mitte. Uuritud tarindilahenduste toimivuse kriteeriumid ja arvutustulemused on kokkuvõtvalt toodud Tabel 7.

Niiskuse toimivuse aspektist on arvutusmodelite kohaselt kõik kolm välja pakutud energiaaktiveeritud SILS seina lahendust (PCM roostevabast terasest kesta sees; PCM graanulid krohvi sees ning PCM krohvi lahendus koos difusioonikanalitega) põhimõtteliselt toimivad. Siiski on ilma difusioonikanaliteta PCM krohvi lahendus ebasoovitav, kuna see on tundlik PV paneeli ja fassaadikrohvi vahelise liitekohta veelekete suhtes. Ükskõik kui elastne see liitekoht on, aja jooksul on sellise praao teke üsna tõenäoline. Arvutusmodelid näitasid et kui kontsentreerida 1% kaldvihma koormusest sellesse prakku, siis tekivad PCM krohvi lagunemiseks vajalikud tingimused paari aastaga.

Kõige vähem materjalimahukas ning töökindlam lahendus võiks olla PCM graanulitega segatud krohv, millesse on pressitud PV paneeli taha jäävad difusioonikanalid. Kui ilma täiendavate veeleketeta mudelis oli difusioonikanaliteta lahendus vaid pisut vähem niiske, siis veelekkete lisandumisel võimaldasid difusioonikanalid liigniiskusel välja kuivada ning pikaajalist niiskuse akumulereerimist õnnestus vältida. Käesolevas töös välja pakutud segukammiga kanalite tõmbamine on aga siiski vaid üks variant. Kõige optimaalsem difusioonikanalite mõõt ja samm ning nende ehitamise täpne lahendus nõuab edasist uurimist.

Iga lahenduse toimivuse taga on suur roll nii fassaadikrohvisüsteemi kui ka PCM krohvi niiskustehniliste omaduste tundmisel. Kui arvutustes kasutatud fassaadikrohvi omadused on Tehnikaülikoolis katseliselt mõõdetud ning arvutusmodelid on kalibreeritud krohaviga tehtud eksperimentide alusel, siis kasutatud PCM krohvi niiskuse funktsioonid ning sorptsioonkõver vajaksid tulevikus kindlasti täpsustamist.

Tabel 7. Erinevate energiaaktiveeritud SILS fassaadilahenduste arvutuslike omaduste võrdlus. Roheline tähendab arvutuslikult toimivat lahendust, punane ja oranž tähistavad potentsiaalset ohtu. Kollaste ja siniste aspektidega tuleks arvestada, kuid need ei tähenda veel vastava tarindilahenduse mitesobivust. Kõiki arvutuslikult uuritud omadusi on tarvilik tulevikus ka katseliselt kontrollida ning täpsustada.

	ENERGIAAKTIVEERITUD SILS*						TAVA SILS	
	Metallkesta sisse kapseldatud PCM		PCM graanulitega krohv, ilma difusioonikanaliteta		PCM graanulitega krohv, difusioonikanaliteta		Traditsiooniline krohvitud fassaad ilma PV ja PCM-ta	
	EPS	Mineraal-vill	EPS	Mineraal-vill	EPS	Mineraal-vill	EPS	Mineraal-vill
PV paneelide kasuteguri suurenemine	Kuni 3,7% aastas		Kuni 2,7% aastas				PV paneelid puuduvad	
PV paneelide maks temperatuuri alandamine	Kuni 20°C madalam PV temp		Kuni 15°C madalam PV temp				PV paneelid puuduvad	
Deformatsioonivuukide vajadus krohvitud fassaadis	Eesti kliimas peaks tegema pragude tekke riski minimeerimiseks deformatsioonivuugid iga 20 meetri tagant							
Deformatsioonivuukide vajadus PV paneelide perimeetris	Erinevate materjalide kokkupuutekohas on temperatuurideformatsioonide vältimiseks vajalikud deformatsioonivuugid						PV paneelid puuduvad	
Tavalise fassaadikrohvi külmumise risk	Eestis asuva edelafassaadi krohvi külmakahjustuste tekkimise risk eksisteerib vähem kui 1% tundidest aastas ekstreemsete väliskliima tingimuste korral. PCM lahendused fassaadikrohvi külmumist oluliselt ei mõjuta.							
Fassaadikrohvi tsoonide erinev niiskus ja temperatuur	Aktiivelemendi temperatuur on kõrgem kui fassaadikrohvi temperatuur. PV paneelide läheduses on krohv kuivem ja soojem, mistõttu fassaadi välisilme võib teatud ajahetkedel olla ebaühtlane						Hea kvaliteedi korral on fassaadikrohvi välimus ühtlane	
Veeaurutiheda kihi taga oleva materjali külmakahjustuste risk	Soojustusmaterjalide külmakahjustuste risk madal		PCM krohvi külmakindlus tagatud kui veelekkeid pole		PCM krohvi külmakindlus on arvutuslikult tagatud		Väliskiht on kõikjal veeauru läbilaskev	
Niiskuse akumulatsioon pikema aja jooksul	Niiskus ei akumuleeru		PCM krohvis niiskus ei akumuleeru kuni ei esine veelekkeid		Niiskus ei akumuleeru		Niiskus ei akumuleeru	
Läbi pragude tungiva kaldvihmakooormuse mõju	Soojustusmaterjalide niiskuskahjustuste risk madal		PV ja fassaadikrohvi liitekohta leke lagundab PCM krohvi		PCM krohvi sisse sattuv täiendav niiskus saab väljuda		Krohvi taha sattuv mõõdukas (1%) kaldvihm kuivab välja	
Erinevate kandekonstruktsiooni algniiskuse mõju	Soojustusmaterjalide niiskuskahjustuste risk madal		Konstruktsiooni ehitusniiskus mõjutab PCM krohvi niiskussisaldust		Ehitus-niiskus mõjutab vähem	Ehitus-niiskus mõjutab rohkem	Ehitus-niiskus mõjutab vähem	Ehitus-niiskus mõjutab rohkem
Krohvi algniiskuse mõju	Veeaurutiheda kihi taga puudub krohv		PCM ehitus-niiskus mõjutab	Ehitus-niiskus kuivab välja	PCM krohvi ehitusniiskus kuivab välja		Fassaadikrohvi ehitusniiskus kuivab välja	
Piirangud PV paneelide mõõtmetele	PCM krohvi niiskussisaldus tõuseb iga lisanduva PV paneeliga		PCM krohvi niiskussisaldus tõuseb iga lisanduva PV paneeliga		Võimalik paigaldada piiramatult PV paneele kõrvuti.		PV paneelid puuduvad	
Lahenduse mass ja vajalike ehitusmaterjalide maht	Metallist kesta mass on suur ning keevitamine on keerukas		Paksu krohvi paigaldamine ja armeerimine on aeganõudev		Paksu krohvikihhi sisse on vaja tõmmata veel täiendavad sooned		Kaua kasutusel olnud lahendus, tavapärased ehitusmaterjalid	

* Tegemist on esialgsete teoreetiliste arvutustulemuste põhjal tehtud järeldustega, kasutades krohvi omaduste ligikaudseid väärtuseid. Rohelisega märgitud lahendused ei pruugi realses elus toimida, enne kui toimivus on tõestatud ka kliimakambri katsetustega ning täismõõdus testhoonete puhul.

Kuigi faasimuutusmaterjalide kõrgeid pinnatemperatuure puhverdav mõju oli igas kliimas märgatav, osutus kogu aasta lõikes kasutegur siiski vaid mõne protsendi suuruseks. Samas pikendab ekstreemsete pinnatemperatuuride alandamine PV paneelide eluiga, kuna ilma faasimuutusmaterjalita võib PV paneelide kriitiline töötemperatuur saada ületatud.

Töö käigus said defineeritud ühe konkreetse krohvisüsteemiga krohvitud fassaadile soovituslikud deformatsioonivuukide sammud viie erineva kliima jaoks. Samas on oluline märkida, et kasutatud arvutusmudel ei arvesta fassaadis olevate akende, kaabliläbiviikude ega soojustusplaatide vuukide ja soojustuse võimaliku kõverdumisega. Lisaks on fassaadide krohvimisel oluline järgida õiget ehitustehnoloogiat. Ilmastikutingimused peavad olema õiged, vältida tuleb otsest päikese kiirgust värskete krohvile jne. Akende ja PV paneelide liitekohad tuleb vormistada korrektsete servaprofiilide abil.

Uuritud fassaadikrohvi külmumisoht sõltus ennekõike väliskliima tingimustest. Üldjuhul ei ole fassaadikrohvi külmumisoht kõrge, kuid ekstreemse kondensaadi testasta puhul on mõned ajahetked, mil külmumise oht eksisteerib. Seda ei mõjuta eriti ei soojustusmaterjal ega soojustatava seina algniiskus.

Kuna PV paneelide paigaldamine heledasse fassaadi toob kaasa fassaadipinna temperatuuride suure erinevuse, siis aitab see osalt PV paneeli taga oleva krohvi niiskusel välja kuivada, kuid tekitab ka probleemi seal, kus fassaadikrohvi temperatuurid on tsooniti erinevad. Jahedate ilmadega võib fassaadikrohv olla visuaalselt „ruuduline“, st et PV paneelide ümber võivad olla ca 50...100mm laiused soojenenud tsoonid samal ajal kui ülejäänud fassaadil võib olla nähtav kaste või härmatis. Samuti võivad olla eri krohvi piirkondadel erinevad eeldused mikrobioloogiliseks (vetikad, samblikud, samblad) kasvuks. Siiski nõuab ka see tulevikus täpsemat uurimist.

Krohvi deformatsioone uurides selgus, et hoolimata PCM-i temperatuure stabiliseerivast mõjust on enamasti heleda fassaadikrohvi pinna ning tumeda PV paneeli pinna temperatuuride vahel sedavõrd suured erinevused, et kindlasti on vajalik aktiivelemendid tavalisest krohvipinnast eraldada elastsete deformatsioonivuukide abil. Lisaks aktiivelementide eraldamisele selgus, et krohvi pragude vältimiseks peaks temperatuuri- ja niiskusdeformatsioonide tõttu ka kogu ülejäänud fassaadiosa deformatsioonivuukidega osadeks jagama.

Väike-Maarja kliimas on soovitatav deformatsioonivuukide samm 20 meetrit, Madridis aga näiteks 29 meetrit. Kuigi SILS fassaadide lagunemise taga on ka mitmeid teisi tegureid peale temperatuuri ja -niiskusdeformatsioonide, tasuks käesoleva töö tulemustele tuginedes kaaluda deformatsioonivuukide laialdasemat kasutamist.

Käesoleva töö tulemuste kontekstis on mõneti keeruline hinnata energiaaktiveeritud SILS fassaadi kasutusega. Edasiste katsetuste mõttes on vaja tagada see et energiaaktiveeritud elemendid poleks tavalisest SILS seinast vähem vastupidavad. Kindlasti on oluline lahendada PV paneelide kinnitusviis ning kaablite ühenduskohad selliselt, et päikesepaneele oleks võimalik vajadusel ükshaaval, võimalikult kerge vaevaga asendada. Üks variant kaabeldust teostada on toodud Lisas 2 Joonisel 2.3.

Üldjoontes on käesoleva tööga tõestatud, et toimiva energiaaktiveeritud SILS fassaadi ehitamine Eesti kliimas on arvutuslikult võimalik. Pärast tulevikus tehtavaid kliimakambri katsetusi võib olla võimalik ehitada täismöödus hoone testsein ning rakendada uudset välisseina lahendust nii uutel kui renoveeritavatel hoonetel.

Kui katta ühe tüüpilise 5-korruselise paneelelamu lõunapoolne otsasein töös analüüsitud viisil 50% ulatuses energiaaktiveeritud elementidega, on võimalik saada 90m² päikesepaneelidega kaetud pinda. Selline fassaad toodaks PCM krohvi lahenduse puhul 3660kWh elektrienergiat aastas. Sellise koguse elektrienergia tootmiseks tänapäevases põlevkivi elektrijaamas paisataks keskkonda 3,5 tonni süsihappegaasi (Elering, 2014). Arvestades et renoveerimist vajavaid hooneid on Eestis tuhandeid, on energiaaktiveeritud SILS fassaadide abil võimalik astuda märkimisväärne samm kliimaneutraalsema tuleviku suunas.

KOKKUVÕTE

Päikesepaneelide integreerimine hoonetega on kogu Euroopas järjest rohkem levimas. Kui sageli kaetakse PV paneelidega katused, siis elektrienergiat tootvaid fassaade kohtab harva. PV paneelide integreerimine laialt levinud, tuttava ehitustehnoloogia ja mõistliku hinnaga soojusisolatsiooni liitsüsteemi (SILS) fassaadiga võiks olla suure potentsiaaliga lahendus, kuna nii planeeritavaid kui renoveerimist vajavaid hooneid on nii Eestis kui kogu Euroopas palju.

PV paneelide integreerimiseks krohvi tasapinda töötati välja kontseptsioon, kus tavalise SILS fassaadi aladega vahelduvad nn energiaaktiveeritud tsoonid, kus soojustuse paksus on 40...50mm võrra väiksem ning selle asemel on faasimuutusmaterjal (PCM) ning õhuke päikesepaneel. PCM-i eesmärk on stabiliseerida PV paneeli pinnatemperatuuri, vältides selle ülekuumenemist ning tõstes elektritoodangu efektiivsust. Käesolevas töös uuriti nii teraskesta sisse kapseldatud PCM-i kui ka krohvi sisse kapseldatud PCM-i ja alumiiniumpulbri segust koosnevaid graanuleid.

Erinevaid lahendusi mudeldades õnnestus arvutuslikult täita kõik püstitatud eesmärgid:

- 1) Välja töötatud arvutusmetoodika sobis SILS + PCM + PV-paneel seinatarindi soojuslikuks ja niiskuslikuks analüüsiks ning võimaldas erinevaid lähtetingimusi muutes saada aimu, milliste niiskuskoormuste suhtes on lahendused tundlikud.
- 2) Sõltuvalt PCM lahendusest õnnestus leida ka veelekete korral toimivaid lahendusi. Kuna difusioonikanalitega PCM krohviga tarind ei viinud PCM krohvi lagunemiseni ning ei muutnud ka fassaadikrohvi niiskemaks, siis võib arvutustulemuste põhjal väita et selline energiaaktiveeritud SILS ei ole arvutuslikult kehvemini toimiv kui tavaline SILS sein. Vastavalt tavalise SILS seina arvutustulemustele võib seega väita, et ka energiaaktiveeritud SILS seina külmakindlus on vaatlusalustes Kesk-Euroopa ja Põhjamaade kliimapiirkondades tagatud.
- 3) Faasimuutusmaterjali temperatuure alandav mõju suutis suurendada PV paneeli elektritoodangut lühiajaliselt üsna palju, kuid aasta keskmisena jäi efektiivsuse tõus enamasti 2%...4% vahemikku. Põhjuseks see, et talvel tõusevad PV pinnatemperatuurid harva nii kõrgele et PCM saaks hakata sulama. Siiski alandab PCM olulisel määral maksimaalseid PV pinnatemperatuure, mis vähendavad PV paneelide kahjustuste ning ekstreemsete deformatsioonide teket.
- 4) Pragude tekke prognoosimise meetod temperatuuri ja niiskuse muutumisest tingitud mahukahanemiste jaoks õnnestus edukalt välja töötada. Ilma akendeta, PV paneelideta ja läbiviikudeta; kvaliteetselt teostatud heleda fassaadi jaoks on arvutuslikult suurim lubatud deformatsioonivuukide samm Eesti kliimas 20 meetrit.

Energiaaktiveeritud fassaadi puhul tuleb kõik PV paneelid fassaadikrohvist eraldada täiendavate deformatsioonivuukidega.

- 5) Kliimakambri katsete jaoks sobivad lahendused võiksid olla PCM graanulitega segatud krohv koos alt avatud difusioonikanalitega ning metallkesta kapseldatud faasimuutusmaterjaliga lahendus. Soojustusena tasub proovida nii EPS-ist kui mineraalvillast soojustust. Kliimakambri katseseina kandekonstruktsiooni võiks ehitada poorbetoonist.

Materjalide lagunemiskindluse mõttes võiks olla metallkestaga PCM lahendus töökindlam, kuna veeaurutiheda kihi taga asub soojustusmaterjal, mis on kõrgetele niiskuskoormustele suhteliselt hästi vastu pidav.

PCM krohviga lahenduse ehitamine peaks olema aga vähem materjalimahukas ning õigesti valitud omadustega PCM krohv aitab siseruumi niiskusel veeaurutiheda kihi tagant fassaadikrohvi poole liikuda. Üks olulisimaid tulemusi oli see, et ilma difusioonikanaliteta seinas PV paneeli ja fassaadikrohvi liitekohas veelekked korral ületati teistest ääretingimustest sõltumatult paari aasta jooksul arvutuslik lagunemispiir märja krohvi külmumise tõttu. Kuigi PCM krohvi omadused vajavad veel edasist täpsustamist, on igati asjakohane soovitada kasutada antud lahendust koos difusioonikanalitega.

Kuna erinevate temperatuurideformatsioonide ning võimalike paigaldusvigade tõttu krohvisüsteemi ja PV paneeli liitekohas on tõenäoliselt pragu, siis on mõistlik luua tarindi väliskihti võimalused liigniiskuse välja juhtimiseks. Selgus et ainult alumisest otsast avatud 1,6 meetri pikkuste difusioonikanalite lõpust kuivab sinna sattunud liigniiskus üsna efektiivselt välja ning väiksemad veelekked ei põhjusta PCM krohvi arvutuslikku lagunemist.

Fassaadikrohvi niiskussisalduses oli märgata märkimisväärsed erinevusi võrreldes mõõtmispunkte vahetult aktiivelemendi vastas ning sellest 200mm kaugusel. Seetõttu võib esineda mõlema PCM lahenduse puhul oht, et teatud ajahetkedel võib krohvipind olla visuaalselt ebaühtlane.

Oluline on ka õige faasimuutusmaterjali tüübi valik. Turul on saada erinevate sulamistemperatuuridega PCM-e, mille toimivust ja efektiivsust tuleks igal juhul eraldi läbi arvutada. Kuid üldine soovitus võiks olla, et katsetamist tuleks alustada sellistest faasimuutusmaterjalidest, mille nominaalne sulamistemperatuur on antud asukoha kliima maksimaalse õhutemperatuuri lähedal. Sel juhul tegeleb PCM ainult päikesekiirguse, mitte õhutemperatuuri mõju pehmendamisega ning suudab öösel ka efektiivselt tahkeks muutuda.

Optimaalse PCM kihi paksuse määrab muuhulgas ära ehitustehnoloogia võimalikkus. Väga paksu krohvikihiti ei ole võimalik paigaldada ning liiga paks metallkest läheb ebamõistlikult raskeks. Samas on vajaliku PCM-i sulamise efekti saavutamiseks vajalik siiski 30...40mm paksune kiht kogu PV paneeli taga.

Energiaaktiveeritud SILS fassaad omab suurt potentsiaali Euroopa hoonefondi energiatõhusamaks muutmisel, mistõttu on oluline jätkata uuringuid eesmärgiga õige pea sellist tarindit ka reaalselt ehitama hakata.

Tänu sõnad

Käesolev magistritöö on osa En-ActivETICS projektist ja töö valmimist on toetatud M-ERA.NET-I raames (ETAG toetus Nr. 3-4/MOBERA1719029); NCBiR (toetus Nr. M-ERA.NET2/2018/2/2019) & SAS (toetus Nr. M-ERA.NET 2 /2018 /786/En-ActivETICS). Samuti Eesti ZEBE tippkeskuse poolt (toetus TK146 ja toetus PRG483) ja Euroopa Komisjoni kaudu programmi H2020 kaudu projekti *Finest Twins* raames (Toetus nr. 856602). Töö autorit on toetatud ka 2020. aasta RKAS Stipendiumiga „Tuleviku Tipud“ ning 2021. aasta Tallinna linna Raestipendiumiga.

SUMMARY

Building Integrated PV Panels are getting more widespread in Europe. Nowadays, applying PV panels on building roofs is getting more common, but relatively large façade surfaces remain mostly untouched. Integrating PV panels with traditional ETICS façades could give building designers another option for cost-effective and aesthetically acceptable energy producing façade. The solution should be possible to apply on many new buildings as well as the ones going under renovation, so it should have a great potential.

For integrating PV panels into façade render, the concept was proposed to create zones for PV panels, where there is 40...50mm less insulation and the room is filled with encapsulated Phase Change Material (PCM) and flexible PV panel. The purpose of PCM is to stabilise the PV panel temperatures in order to maximise the efficiency and lengthen the lifespan of PV panel. In this paper, two options for encapsulating PCM were researched: PCM encapsulated in metal casing and watertight PCM granules mixed with façade plaster.

Using different Delphin 6 thermal and hygrothermal models, all the objectives of the research were archived:

- 1) The methodology for hygrothermal calculations for ETICS + PCM + PV panel wall turned out to be appropriate and gave us the information, which parameters are critical to meet the thermal and hygrothermal requirements.
- 2) It was possible to develop solutions which are more resistant for water leakages behind the façade plaster. The solution with diffuse canals for PCM granules mixed with mortar was as resistant to frost damage as traditional ETICS. It was found out that theoretically traditional ETICS should work in all the climates under research, so the energy activated ETICS should also be hygrothermally stable.
- 3) PCM layer was able to reduce the peak temperatures of PV panels for more than 20°C, which could lengthen the lifespan of the PV panel. However, annual energy output increased only around 2%...4% because at the winter, temperatures seldom rise high enough for PCM to melt up properly.
- 4) Methodology for calculating temperature and moisture deformations was proposed in the paper. It turned out that for the façade without windows, cables, ducts and PV panels with high quality workmanship, the step for deformation profiles should be 20 meters in Estonia. For energy activated ETICS, additional deformation profiles should be applied in the perimeter of PV panels.
- 5) For climate chamber tests, both the metal casing solution and the granulated PCM plaster with diffusion canals were chosen to be worth of researching. Both the

mineral wool and EPS insulation should be studied. The load bearing structure of the test wall should be aerated concrete.

In aspect of deterioration resistance, the PCM solution with metal casing should be preferred, because at the back of the PCM case is the insulation material, capable of working well in humid conditions.

PCM plaster solution should need less building materials to construct and with right selection of plaster, the moisture should still be able to dry out behind the PV panel. However, the solution is sensitive to water leakage caused by a crack in the joint between PV panel and façade plaster. In order for moisture to dry out in case of the leakage, the diffusion canals are needed. However the material properties of the PCM plaster used were preliminary and would need further research.

Because the chance of the joint cracks to appear is relatively great, the 1,6 meters long diffusion canals, opened only at the below, were proposed. Besides diffusion, it enables the moisture to dry out with the conduction as well as small droplets could fall inside the canals. So, it would be much more safe solution in terms of hygrothermal performance.

It was found out that there was a great difference in moisture content in façade plaster close to PV panel and 200mm further away. So there is a possibility for the façade render to look uneven in certain conditions. This aspect would need some further research.

The selection of PCM wax for each climate location should be made after the thermal calculations, similar to the ones in this paper. But the candidates should be selected from the materials with nominal melting temperature just around the maximum air temperature of the selected location. So the PCM is able to deal with the insolation effects and is able to cool down properly during the night.

Optimal thickness of PCM is determined by the construction technology limits. It is not possible to apply very thick layer of façade plaster on the EPS or mineral wool and the metal casing cannot be very thick because of the great mass. However, for the PV to cool down effectively, around 30 to 40mm of PCM should be needed.

Energy Activated ETICS has a great potential to make European building stock more energy efficient and could get us closer to carbon neutral society. So, the solutions in this paper should be studied further in the laboratory and at the building scale.

Acknowledgements

This research was supported by the project En-ActivETICS: in a framework of M-ERA.NET by ETAG (grant No. 3-4/MOBERA1719029), NCBiR (grant No. M-ERA.NET2/2018/2/2019) & SAS (grant No. M-ERA.NET 2 /2018 /786/En-ActivETICS), by Estonian Centre of Excellence ZEBE (grant TK146), by the personal research funding (grant PRG483), and by European Commission through the H2020 project Finest Twins (grant No. 856602). Author of the current research has received scholarship by RKAS (2020) and Rae scholarship of city of Tallinn (2021).

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- ASHRAE 160P. (2008). *Criteria for moisture control design analysis in buildings*. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, GA.
- Bauklimatik-Dresden. (2021). *Delphin software kodulehekülg*. Bauklimatik-Dresden. <http://bauklimatik-dresden.de/delphin/index.php?aLa=en>
- BPIE. (2011). Europe 's buildings under the microscope, Buildings Performance Institute Europe. In *Buildings Performance Institute Europe (BPIE)*. <https://doi.org/ISBN:9789491143014>
- Browne, M. C., Norton, B., & McCormack, S. J. (2015). Phase change materials for photovoltaic thermal management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 762–782. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.050>
- Climate.OneBuilding.Org. (2019). *Repository of free climate data for building performance simulation*. http://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/
- Djamai, Z. I., Salvatore, F., Si Larbi, A., Cai, G., & El Mankibi, M. (2019). Multiphysics analysis of effects of encapsulated phase change materials (PCMs) in cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 119(January), 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.002>
- Duraković, B. (2020). *PCM-Based Building Envelope Systems: Innovative Energy Solutions for Passive Design*. Springer.
- EC COM/2018/773. (2018). *Puhas planeet kõigi jaoks Euroopa pikaajaline strateegiline visioon, et jõuda jõuka, nüüdisaegse, konkurentsivõimelise ja kliimaneutraalse majanduseni. Komisjoni teatis*. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>
- Ehitusseadustik, RT I, 05.03.2015, 1. § 11. (2015). *Riigi Teataja*. <https://www.riigiteataja.ee/akt/105032015001>
- Elering. (2014). *Eesti pikaajalised elektritootmisstsenaariumid*. Eleringi toimetised. <https://www.digar.ee/arhiiv/et/periodika/42445>
- Energiatõhususe nõuete erisused... (2018). Hoone energiatõhususe miinimumnõuded, RT I, 13.12.2018. § 8. *Riigi Teataja*. <https://www.riigiteataja.ee/akt/113122018014>
- EP Direktiiv. (2010). *Hoonete energiatõhususe kohta, Euroopa parlamendi ja nõukogu direktiiv, 2010/31/EL*. 19. mai. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:et:PDF>
- EP määrus. (2020). *Euroopa kliimaseadus, Euroopa parlamendi ja nõukogu määrus, millega kehtestatakse kliimaneutraalsuse saavutamise raamistik ja muudetakse määrust, (EL) 2018/1999*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020PC0080&from=ET>

- EP Määrus. (2011). Millega sätestatakse ehitustoodete ühtlustatud turustustingimused. (EL) nr 305/2011. *Euroopa Liidu Teataja*, 305. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011R0305&from=EN>
- ESTplast. (2021). *ESTplast fassaadimaterjalide omadused*. ESTplast. <https://estplast.ee/est/eps-60-silver-fassaad/>
- ETAG 004. (2013). *ETAG 004: External thermal insulation composite systems (ETICS) with rendering*. EOTA (European Organisation for Technical Approvals) (pp. 1–229).
- EVS-EN 1015-19. (2005). *Müürimõrde katsemeetodid. Osa 19: Kivistunud krohvimõrde veeauru läbilaskvuse määramine*. Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus.
- EVS-EN ISO 15148. (2003). *EVS-EN ISO 15148_2003.pdf*. Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus.
- EVS-EN ISO 15927-3. (2009). *Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data - Part 3: Calculation of a drivingrain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data*. Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus.
- EVS-EN15026. (2007). *Hoone elementide ja piirdetarindite soojus- ja niiskustehniline toimivus. Niiskuslevi hindamine numbrilise modelleerimisega*. Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus.
- EVS 908-1. (2016). *Hoone piirdetarindi soojuslähivuse arvutusjuhend. Osa 1: Välisõhuga kontaktis olev läbipaistmatu piire*. Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus.
- Flisom AG. (2021). *eFlex 1.6m FF60 data sheet*. <https://www.energy-xprt.com/downloads/eflex-model-16m-lightweight-flexible-solar-panels-brochure-789915>
- Freitas, S. S. de, & de Freitas, V. P. (2016). Cracks on ETICS along thermal insulation joints: case study and a pathology catalogue. *Structural Survey*, 34(1), 57–72. <https://doi.org/10.1108/SS-09-2015-0043>
- Gan, G. (2009). Numerical determination of adequate air gaps for building-integrated photovoltaics. *Solar Energy*, 83(8), 1253–1273. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.02.008>
- Gold Coast Solar Power Solutions. (2019). *Common problems with solar panels*. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=Rw8XuB0BSVI>
- Grunewald, J. (1996). Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energie- transport in kapillarporösen Baustoffen. *Diss. TU Dresden, January 1997*, 220.
- Grunewald, J. (2018). *Hygrothermal Material Characterization. Basics & Overview*. Dresdneri Tehnikaülikool.
- Hagentoft, C.-E. (2001). *Introduction to Building Physics*. Studentlitteratur AB.
- Hallik, J., & Kalamees, T. (2020). A new method to estimate point thermal transmittance based on combined two-dimensional heat flow calculation. *E3S Web of Conferences*, 172, 1–8. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017208005>

- Hasan, A., McCormack, S. J., Huang, M. J., & Norton, B. (2010). Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaics. *Solar Energy*, 84(9), 1601–1612.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.06.010>
- Hasan, A., McCormack, S. J., Huang, M. J., Sarwar, J., & Norton, B. (2015). Increased photovoltaic performance through temperature regulation by phase change materials: Materials comparison in different climates. *Solar Energy*, 115, 264–276.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.02.003>
- Heim, D., & Wieprzkowicz, A. (2016). Positioning of an isothermal heat storage layer in a building wall exposed to the external environment. *Journal of Building Performance Simulation*, 1–13. <https://doi.org/10.1080/19401493.2015.1126649>
- Ho, C. J., Tanuwijaya, A. O., & Lai, C. M. (2012). Thermal and electrical performance of a BIPV integrated with a microencapsulated phase change material layer. *Energy and Buildings*, 50, 331–338. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.04.003>
- Hoonete energiatõhususarvude piirväärtused. (2018). Hoone energiatõhususe miinimumnõuded, RT I, 13.12.2018, 14. Lisa 2. *Riigi Teataja*.
<https://www.riigiteataja.ee/akt/113122018014>
- Huang, M. J., Eames, P. C., & Norton, B. (2006). Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics. *Solar Energy*, 80(9), 1121–1130. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.10.006>
- Ilomets, S. (2017). *Renovation Need and Performance of Envelopes of Concrete Apartment Buildings in Estonia*. TTÜ Kirjastus.
- Ilomets, S., Kalamees, T., & Tariku, F. (2019). Indoor climate loads for dwellings in different cold climates to assess hygrothermal performance of building envelopes. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 46(11), 963–968.
<https://doi.org/10.1139/cjce-2019-0079>
- Ilomets, S., Kalamees, T., & Vinha, J. (2018). Indoor hygrothermal loads for the deterministic and stochastic design of the building envelope for dwellings in cold climates. *Journal of Building Physics*, 41(6), 547–577.
<https://doi.org/10.1177/1744259117718442>
- International Energy Agency. (2019). *Tracking Power 2019 - Solar PV*.
<https://www.iea.org/reports/tracking-power-2019/solar-pv>
- Jäger-Waldau, A. (2019). Snapshot of photovoltaics—February 2019. *Energies*, 12(5).
<https://doi.org/10.3390/en12050769>
- Jun Huang, M. (2011). The effect of using two PCMs on the thermal regulation performance of BIPV systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(3), 957–963. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.11.032>
- Kertsmik, K.-A. (2021). *Arhitekti visualiseering Sõpruse pst 246 hoone näitel energiaaktiveeritud krohvisüsteemiga renoveeritava hoone otsaseinast*. Tallinn.

- Khanna, S., Sundaram, S., Reddy, K. S., & Mallick, T. K. (2017). Performance analysis of perovskite and dye-sensitized solar cells under varying operating conditions and comparison with monocrystalline silicon cell. *Applied Thermal Engineering*, 127, 559–565. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.030>
- Kingspan. (2019). *Kooltherm K5 toimivusdeklaratsioon*.
<https://www.kingspan.com/ee/et-ee/tooted/soojustus/kooltherm/kooltherm-k5-krohvitav-valisseinaplaat>
- Kurnitski, J., Kuusk, K., Tark, T., Uutar, A., Kalamees, T., & Pikas, E. (2014). Energy and investment intensity of integrated renovation and 2030 cost optimal savings. *Energy and Buildings*, 75, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.044>
- Kvande, T., Bakken, N., Bergheim, E., & Thue, J. V. (2018). Durability of ETICS with rendering in Norway-Experimental and field investigations. *Buildings*, 8(7).
<https://doi.org/10.3390/buildings8070093>
- Liisma, E., Lõhmus, G., & Raado, L. M. (2015). The effect of temperature and humidity on the permanence of external thermal insulation composite systems. *Procedia Engineering*, 108, 340–348. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.156>
- Liisma, E., Sepri, R., Raado, L. M., Lill, I., Witt, E. D. Q., Sulakatko, V., & Põldaru, M. (2016). Defect analysis of renovated facade walls with etics solutions in cold climate conditions. *CESB 2016 - Central Europe Towards Sustainable Building 2016: Innovations for Sustainable Future, June*, 174–181.
- Linzmeier. (2020). *LINIREC Building panel Technical data*.
https://www.ruumala.com/wp-content/uploads/2020/07/EN_TD_LINIREC-2020.pdf
- Marani, A., & Nehdi, M. L. (2019). Integrating phase change materials in construction materials: Critical review. *Construction and Building Materials*, 217, 36–49.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.064>
- Martinson, R. (2020). Üle Eesti käib kibekiire päikesejaamade ehitus. *Postimees*.
<https://leht.postimees.ee/6999038/ule-eesti-kaib-kibekiire-paikesejaamade-ehitus>
- Nassar, Y. F., & Salem, A. A. (2007). The reliability of the photovoltaic utilization in southern cities of Libya. *Desalination*, 209(1-3 SPEC. ISS.), 86–90.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.04.013>
- Nicolai, A. (2008). *Modeling and Numerical Simulation of Salt Transport and Phase Transitions in Unsaturated Porous Building Materials*. September 2015, 251.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2016.2088>
- Olsson, L. (2017). Rain intrusion rates at façade details - A summary of results from four laboratory studies. *Energy Procedia*, 132(June), 387–392.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.639>

- Pihelo, P. (2020). *Hygrothermal Performance of Prefabricated Timber Frame Insulation Elements for Deep Energy Renovation of Apartment Buildings* [Tallinna Tehnikaülikool]. <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/d748fbdf-83e0-4377-a8d3-5e7e327e102e>
- prEN 15026:200620. (2020). *prEN 15026 Hygrothermal performance of building components and building elements - Assessment of moisture transfer by numerical simulation*. Technical Committee CEN/TC 89.
- Radziemska E. (2003). The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells. *Renewable Energy*, 28, 1–12.
<https://doi.org/10.1109/ICMLC.2004.1380410>
- Rajvikram, M., & Sivasankar, G. (2019). Experimental study conducted for the identification of best heat absorption and dissipation methodology in solar photovoltaic panel. *Solar Energy*, 193(March), 283–292.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.053>
- Ritchie, H., & Roser, M. (2017). Renewable Energy. *OurWorldInData*.
<https://ourworldindata.org/renewable-energy>
- RT25HC Data Sheet. (2021). *RT25HC. Rubitherm Technologies GmbH*.
https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-RT25HC_EN_09102020.PDF
- Rubitherm. (2021). *Rubitherm PCM RT series. Diverse organic PCM*.
<https://www.rubitherm.eu/index.php/produktkategorie/organische-pcm-rt>
- Sami, S. (2018). Modeling and Simulation of a Novel Combined Solar Photovoltaic-Thermal Panel and Heat Pump Hybrid System. *Clean Technologies*, 1(1), 89–113.
<https://doi.org/10.3390/cleantechnol1010007>
- Shi, X., Memon, S. A., Tang, W., Cui, H., & Xing, F. (2014). Experimental assessment of position of macro encapsulated phase change material in concrete walls on indoor temperatures and humidity levels. *Energy and Buildings*, 71, 80–87.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.001>
- Sto-Armierungsputz tooteleht. (2020). *Sto-Armierungsputz. Technisches Merkblatt*. Sto Ges.m.b.H.
- Sto Faserputz toimivusdeklaratsioon. (2018). *Sto-Faserputz product declaration*. Sto SE & Co. KGaA. <https://www.sto.pl/s/produkt/a1F2p00000PivE2EAJ/stofibre-render>
- Sulakatko, V. (2019). *Ehitusprotsessi mõjufaktorite modelleerimine õhekrohv fassaadide lagunemisel*. Tallinna Tehnikaülikool, Inseneriteaduskond, Ehituse ja arhitektuuri instituut.
- SunPower. (2018). *SunPower SPR-E-Flex-50 spec sheet*. SunPower Corporation.
https://us.sunpower.com/sites/default/files/50w-flexible-panel-spec-sheet-0_0.pdf
- TenWolde, A. (2008). ASHRAE standard 160P-criteria for moisture control design analysis in buildings. *ASHRAE Transactions*, 114 PART 1, 167–171.

- Toledo, C., López-Vicente, R., Abad, J., & Urbina, A. (2020). Thermal performance of PV modules as building elements: analysis under real operating conditions of different technologies. *Energy and Buildings*, 223, 110087.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110087>
- Volkova, K. (2021). *Temperatuuri, niiskuse ja mehaaniliste omaduste mõju ETICS õhekrohvisüsteemi praotekkele*. Tallinna Tehnikaülikool.
- Volkova, K., Põldaru, M., Ilomets, S., Kalamees, T., Talvik, M., & Heim, D. (2021). *The effect of temperature, humidity and mechanical properties on crack formation on external thin plasters of ETICS*. International Building Physics Conference.
- Webertherm 305. (2021). *Webertherm 305 tehnilised andmed*. Saint-Gobain Weber.
<https://www.ee.weber/fassaadid/fassaadide-ehitamine-ja-renoveerimine/webertherm-305>
- Ximenes, S., de Brito, J., Gaspar, P. L., & Silva, A. (2015). Modelling the degradation and service life of ETICS in external walls. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 48(7), 2235–2249. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0305-8>

LISAD

Lisa 1. Peamised *Delphini* kasutatavad võrrandid

Niiskusliku tasakaalu võrrand:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^{m_{w+v+i}} = -\frac{\partial}{\partial x} \left[j_{conv}^{m_w} + j_{conv}^{m_v} + j_{diff}^{m_v} \right] + \sigma_{REV}^{m_{w+v+i}}$$

Kus:

$\rho_{REV}^{m_{w+v+i}}$ – Nii vee, veeauru kui jää kujul uuritavas elemendis olev niiskuse kogus mahuühiku kohta (kg/m^3);

$\sigma_{REV}^{m_{w+v+i}}$ – niiskusallika intensiivsus ühe mahuühiku kohta ($\text{kg}/(\text{m}^3\text{s})$);

$j_{conv}^{m_w}$ – vee konvektiivne niiskusvool ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$);

$j_{conv}^{m_v}$ – veeauru konvektiivne niiskusvool ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$);

$j_{diff}^{m_v}$ – veeauru difusiooni teel toimuv niiskusvool ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$)

Soojusliku tasakaalu võrrand:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^U = -\frac{\partial}{\partial x} \left[j_{diff}^Q + u_l \cdot j_{conv}^{m_l} + u_g \cdot j_{conv}^{m_g} + h_v \cdot j_{diff}^{m_v} + h_{voc,g} \cdot j_{diff}^{m_{voc,g}} \right] + \sigma_{REV}^U$$

Kus:

ρ_{REV}^U – Uuritavas elemendis olev siseenergia tihedus (J/m^3);

σ_{REV}^U – energiaallika intensiivsus ühe mahuühiku kohta (W/m^3);

j_{diff}^Q – difusiooni teel liikuv soojusvoog ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$);

u_l – vedeliku siseenergia (J/kg);

$j_{conv}^{m_l}$ – vedeliku konvektiivne niiskusvool ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$);

u_g – gaaside siseenergia (J/kg);

$j_{conv}^{m_g}$ – gaasiline konvektiivne niiskusvool ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$);

h_v – veeauru siseenergia (J/kg);

$j_{diff}^{m_v}$ – veeauru difusiooni teel toimuv niiskusvool ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$)

$h_{voc,g}$ – gaaside siseenergia (J/kg);

$j_{diff}^{m_{voc,g}}$ – gaaside difusiooni teel toimuv niiskusvool ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$)

Kaldvihma koormuse leidmisel arvestatakse horisontaalpinnale langevate sademete ning tuule suuna ja kiirusega. Vertikaalsele pinnale langevad kaldvihma koormused (*Wind Driven Rain* ehk *WDR*) on arvutatud vastavalt standardile (EVS-EN ISO 15927-3, 2009), kasutades valemeid:

$$I_{WS} = I_S \cdot C_R \cdot C_T \cdot O \cdot W$$

$$I_S = \frac{2}{9} \sum v \cdot r^{8/9} \cdot \cos(D - \theta)$$

$$C_R(z) = K_R \cdot \ln(z/z_0)$$

Kus:

I_{WS} - Uuritava perioodi jooksul seinale langevate sademete kogus (l/m^2);

I_S - lagedal maastikul horisontaalpinnale langevate sademete kogus (nn lennuvälja indeks) (l/m^2);

C_R - maastikku iseloomustav koefitsient (-);

C_T - maapinna reljeefist sõltuv koefitsient (-);

O - läheduses asuvate takistuste hulgast sõltuv koefitsient (-);

W - horisontaalkoormuse seinale teisendamise koefitsient (-);

v - ühe tunni keskmine tuule kiirus (m/s);

r - ühe tunni summaarne sademete hulk (mm);

D - ühe tunni keskmine tuule suund (asimuut, °);

θ - seina suund (asimuut, °);

N - arvutuses kasutatud aastate arv (-);

K_R - maastiku iseloomust sõltuv koefitsient (-);

z - arvutuspunkti kõrgus maapinnast (m);

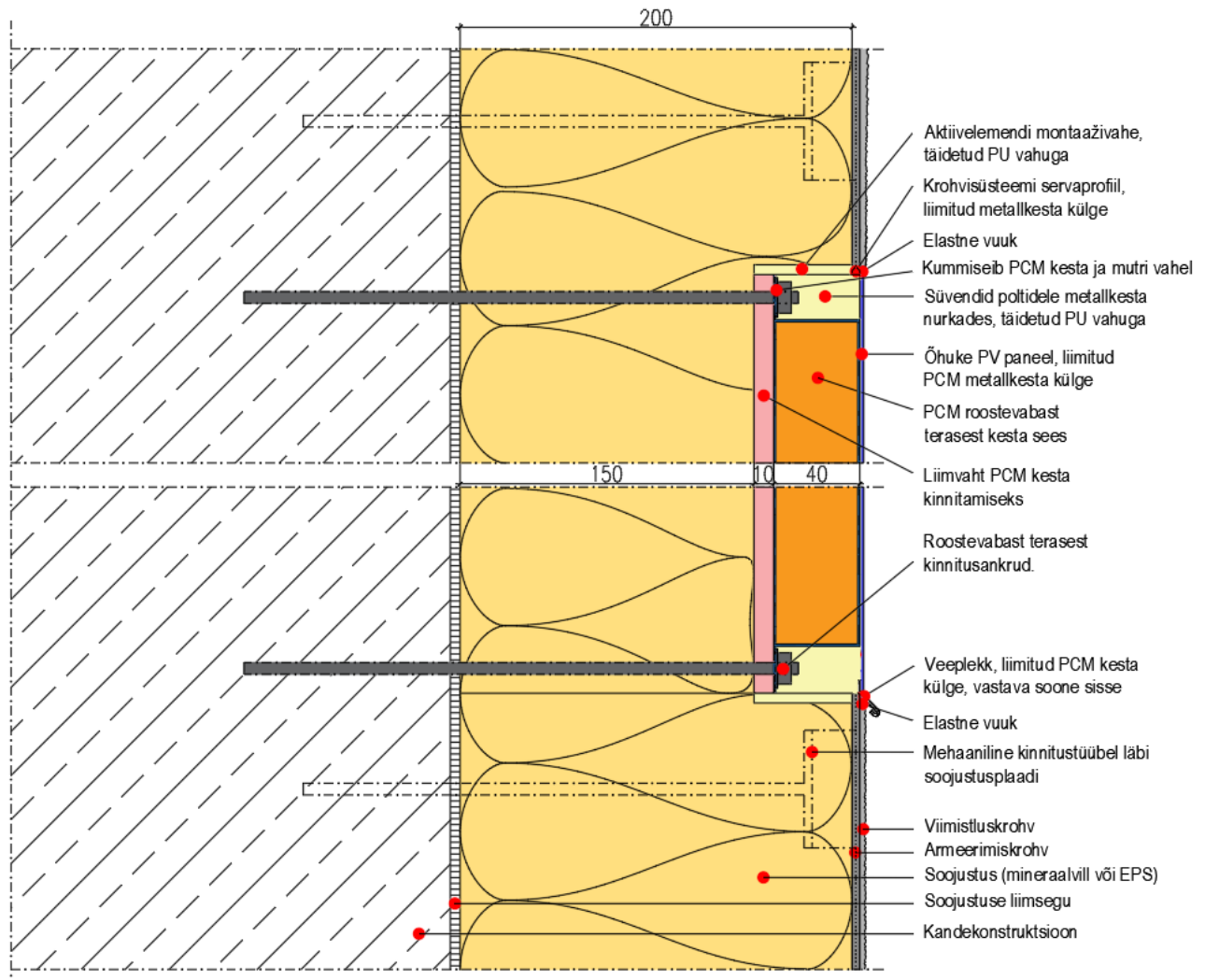
z_0 - arvutuspikkus (m).

Käesolevas töös on kasutatud allolevaid konstantide väärtuseid:

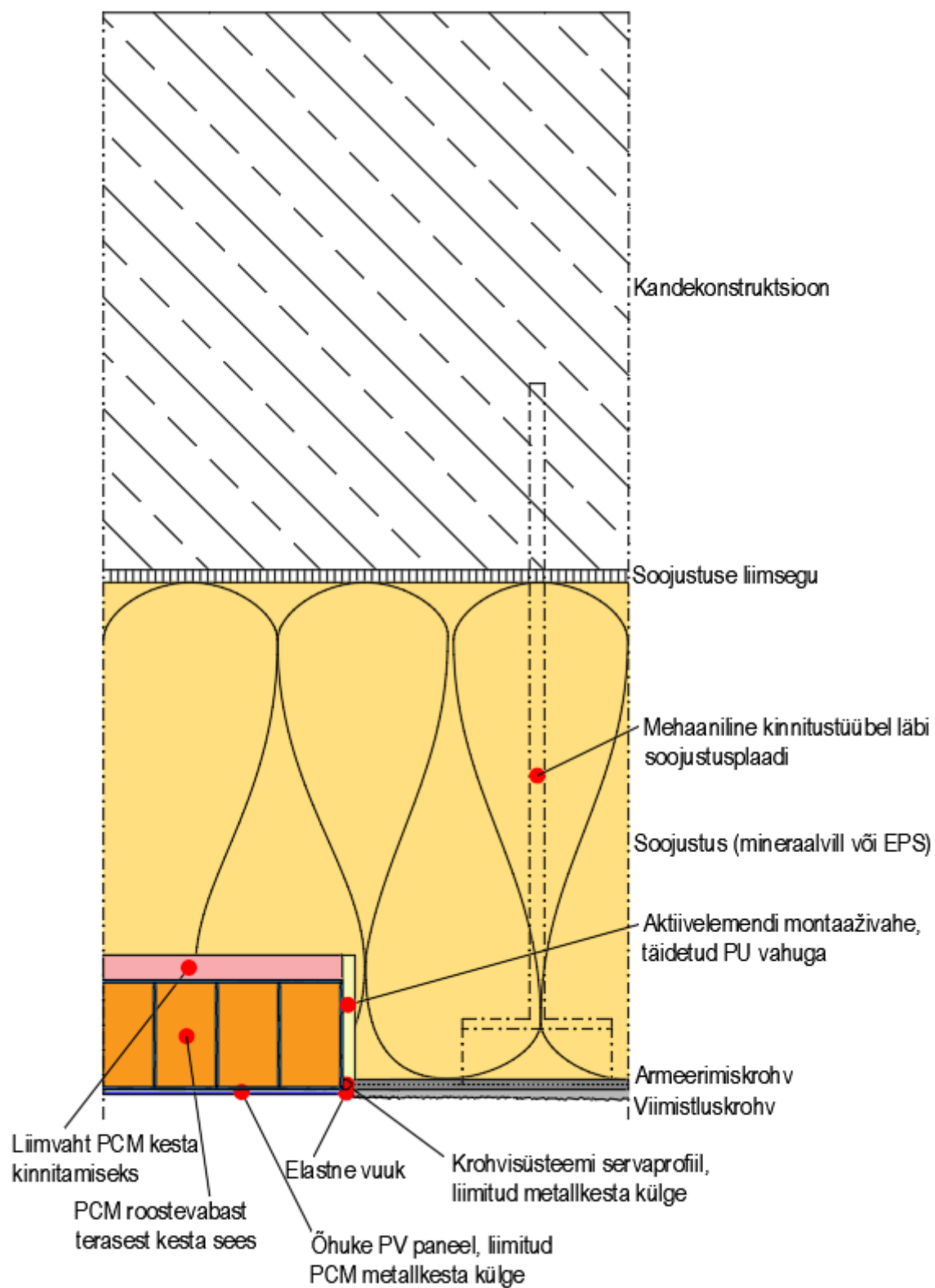
Konstant	Väärtus	Põhjendus
$K_R =$	0,19	Maastikutüüp II. Väheste hoonete ja puudega maapiirkond. Tuulele avatud.
$z_{min} =$	4,0	
$z_0 =$	0,05	
$z =$	10,0	Arvutab seina osa, mis asub 10m kõrgusel maapinnast
$C_T =$	1,0	Hoone ei asu nõlval
$O =$	0,80	Takistus asub seinast 80...100m kaugusel
$W =$	0,40	Delphin 6 vaikimisi väärtus
$\theta =$	90°...270°	Seina orientatsiooni asimuut. 90°=ida, 180°=lõuna, 270°=lääs

Lisa 2. Uuritavate tarindite ristlõiked

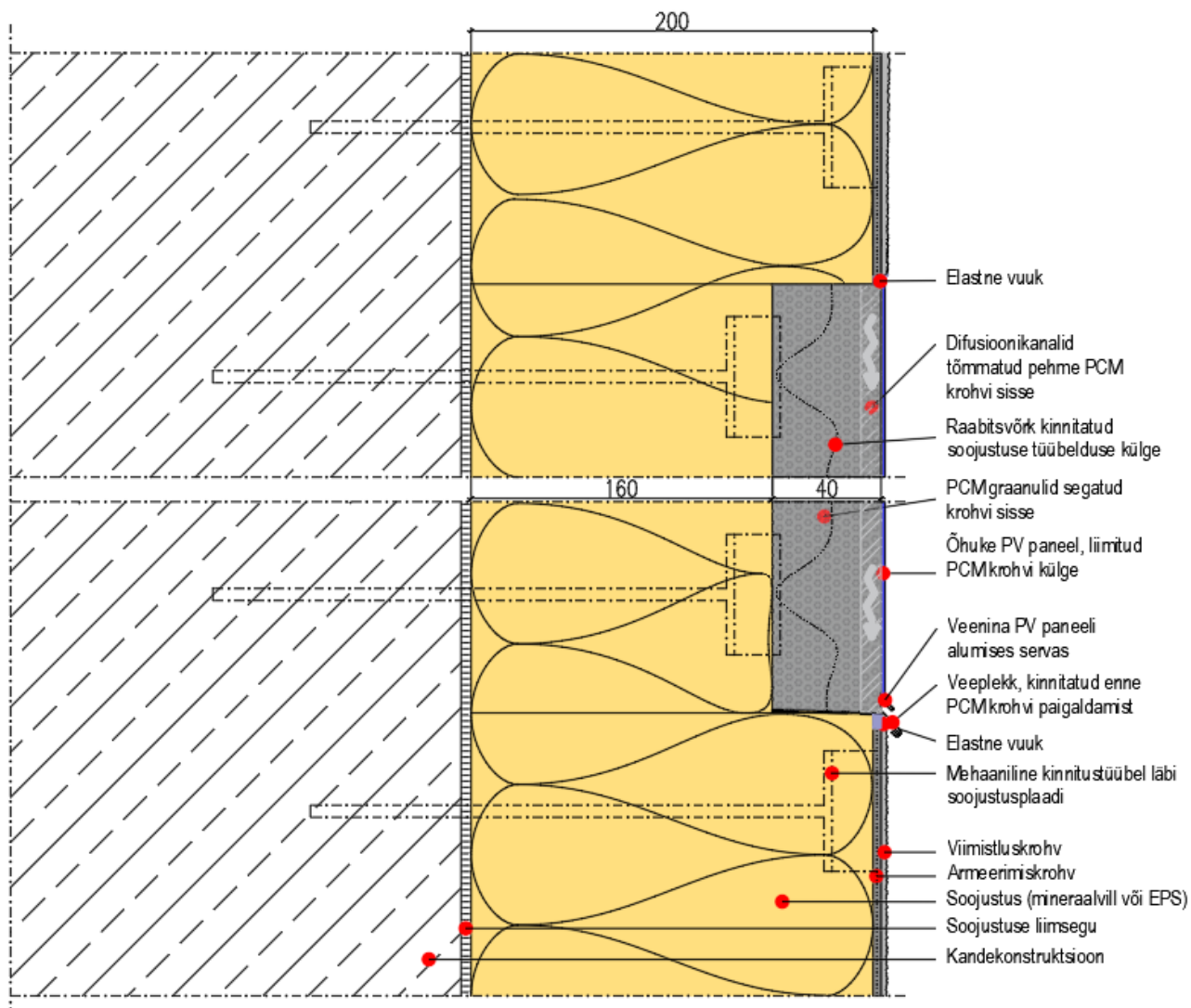
Lisa 2.1.1 PCM metallkestaga lahenduse vertikaallõige



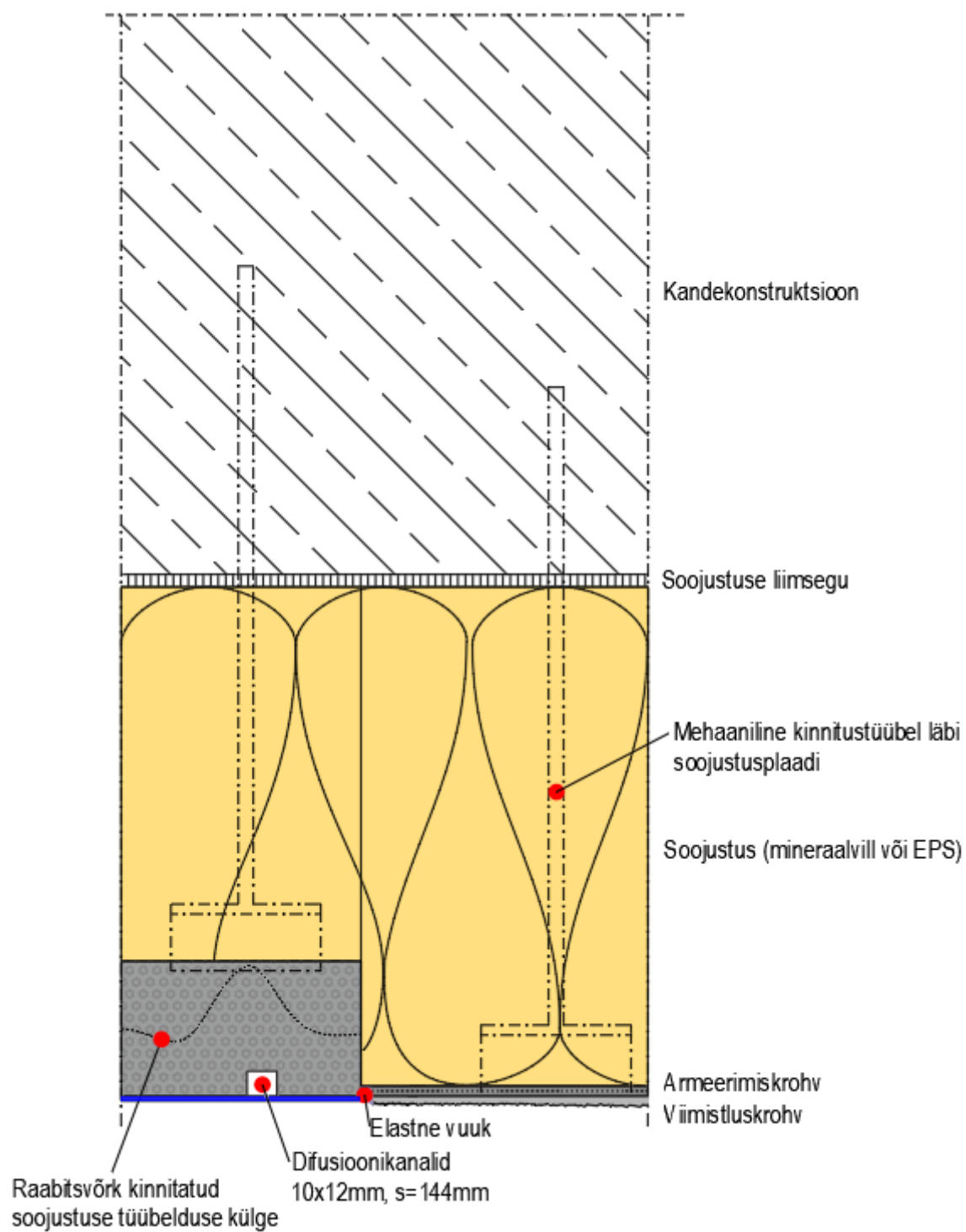
Lisa 2.1.2 PCM metallkesta lahenduse horisontaallõige



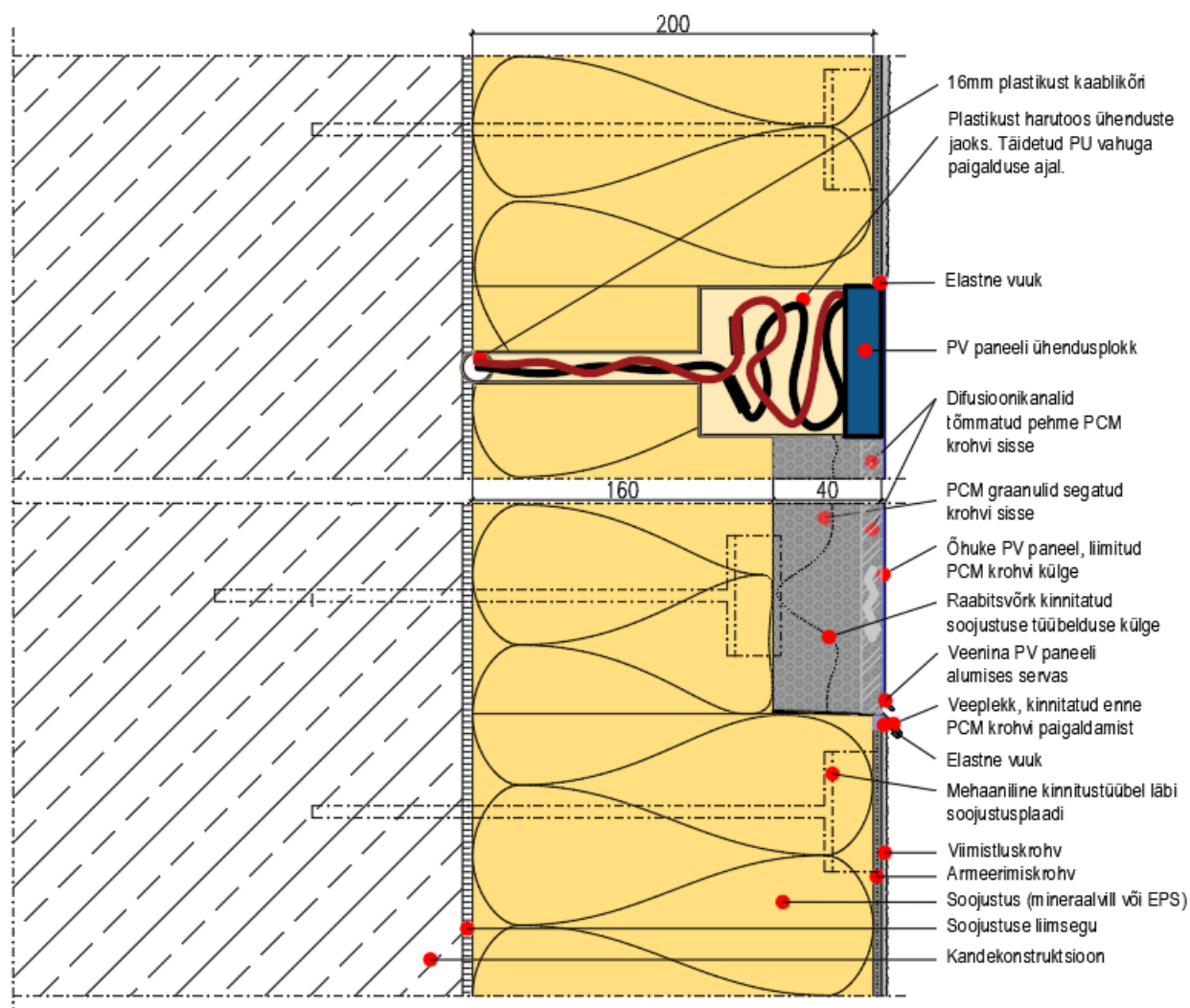
Lisa 2.2.1 PCM krohviga lahenduse vertikaallõige



Lisa 2.2.2 PCM krohviga lahenduse horisontaallõige



Lisa 2.3 Aktiivelemendi kaabelduse ühendamise ja tihendamise näide



Lisa 3. Materjalide omaduste tabel

	1	2	3	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	Betoon	Liimsegu	EPS Silver	EPS Silver (93% RH)*	Silikoon-liim	PV paneel	Roostevabateras	Faasimuutusmaterjal	Krohvisüsteem	PU liimvaht	Mineraal vill	Linirec soojustus	Alumiinium	Poorbetoon	Fenoolsoojustus	PCM Mineraalses krohvis	PCM RV terasest kestas	Silikaattellis
Tihedus (Bulk density) ρ , kg/m ³	2320	707	35	35	2590	1515	7900	880 Tahke 770 Vedel	1365	45	67	550	2700	390	35	1321	-	1744
Poorsus (Porosity) θ , m ³ /m ³	0,143	0,733	0,935	0,935	-	-	-	-	0,067	0,92	0,92	0,94	-	0,87	0,987	0,14	-	0,359
Erisoojus (Heat capacity) c , J/(kg*K)	850	945	1500	1500	1000	1000	500	Vastavalt u(T) graafikule**	1000	1500	840	1500	900	1081	1470	Vastavalt u(T) graafikule**	Vastavalt u(T) graafikule**	850
Soojuserihtivus (Thermal conductivity) λ_{dry} , W/(m·K)	2,1	0,21	0,032	0,034	1,53	0,8	15	1,13	0,7	0,029	0,035	0,083	235	0,095	0,021	0,78	1,6	0,82
Lühilainekiirguse neelduvustegur (Absorption coefficient) A_{λ} , -	-	-	-	-	-	0,84	-	-	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Veeauru difusioonitakistus (Water vapour diffusion resistance factor) μ_{λ} , -	110	25	30	-	-	-	-	-	715***	104	1	-	-	7	114	37	-	28
Suhteline difusioonitakistus (Equivalent vapour diffusion thickness) S_d , m	-	-	-	-	-	10000	-	-	2,83***	-	-	-	10000 (veeauru tiheda kesta jaoks)	-	-	-	10000	-
Veeläbivus (Water uptake coefficient) A_{wR} , kg/(m ² *s ^{0,5})	0,00833	0,0376	1*10 ⁻⁵	-	-	-	-	-	0,00345	0,0001	0	-	-	0,043	0,0089	0,0347	-	0,0497
Kapillaame veejuhtivus (Liquid water conductivity) k_l , kg/(m·s·Pa)	4,401*10 ⁻¹¹	3,182*10 ⁻⁹	0	-	-	-	-	-	4.18*10 ⁻¹³	0	0	-	-	6,026*10 ⁻¹⁰	1,063*10 ⁻¹¹	3,248*10 ⁻¹¹	-	5,914*10 ⁻¹⁰
Algniiskus (Initial moisture content) w_0 , m ³ /m ³	0,058 ... 0,11	0,0119 ... 0,1	0,0011	-	-	-	-	-	0,0023	0,00108	8,1*10 ⁻⁵	-	-	0,0155 ... 0,25	0,00200	0,0134	-	0,036...0,25
Algniiskus (Initial moisture content) w_0 , RH	80 ... 99,6	80 ... 99,8	80	-	-	-	-	-	80	80	80	-	-	80 ... 99,0	80	80	-	80...97,6

* 93%RH juures olevat EPS soojustust kasutati soojustuse kasuteguri arvutuses

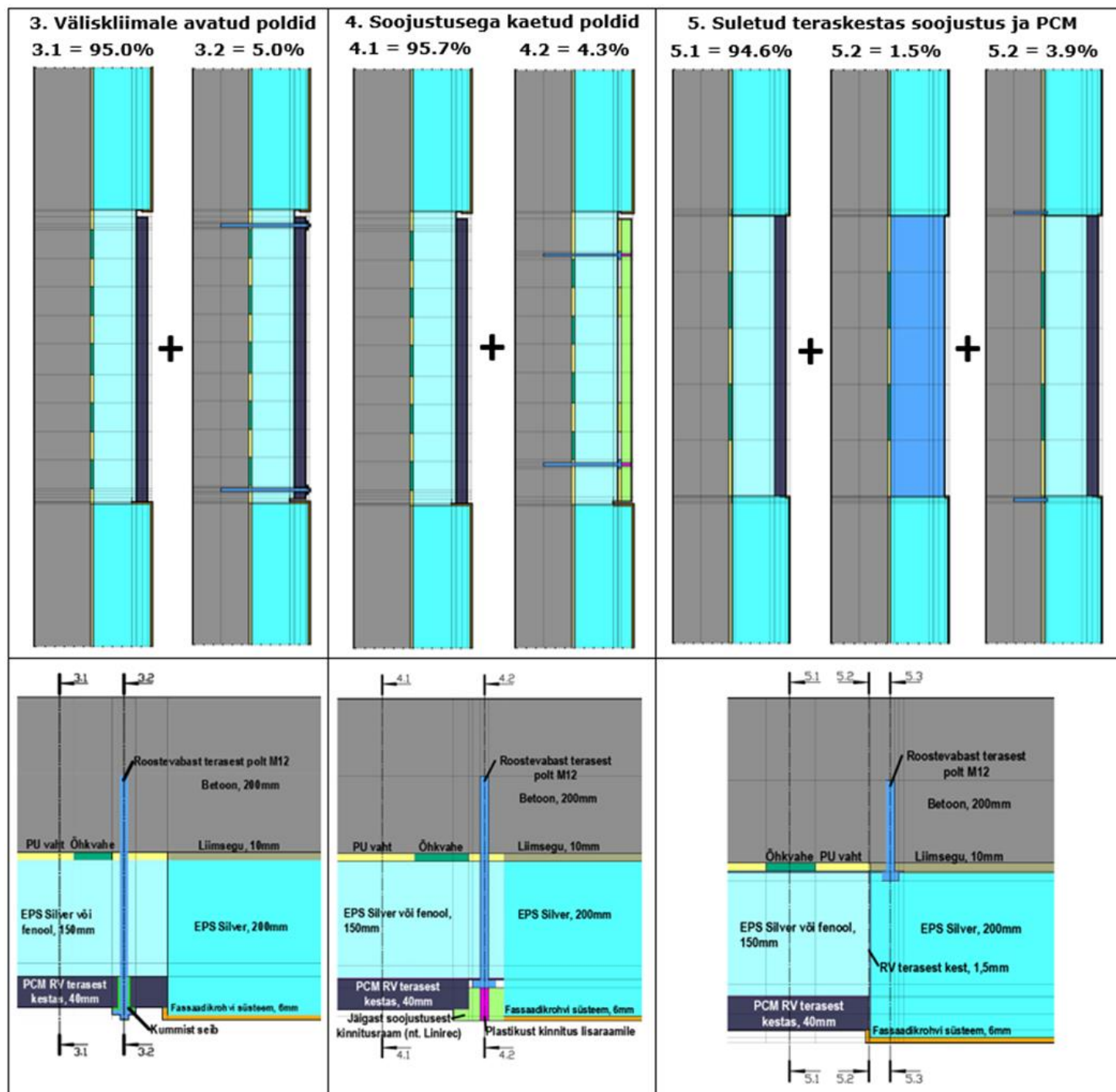
** Siseenergia funktsiooni u(T) näidis on toodud joonisel 17

*** Mõõdetud dry cup katsega, 11/43%RH, 5mm paksuse krohvikihiga

Lisa 4. Valitud painduva PV paneeli elektrotehnilised andmed.

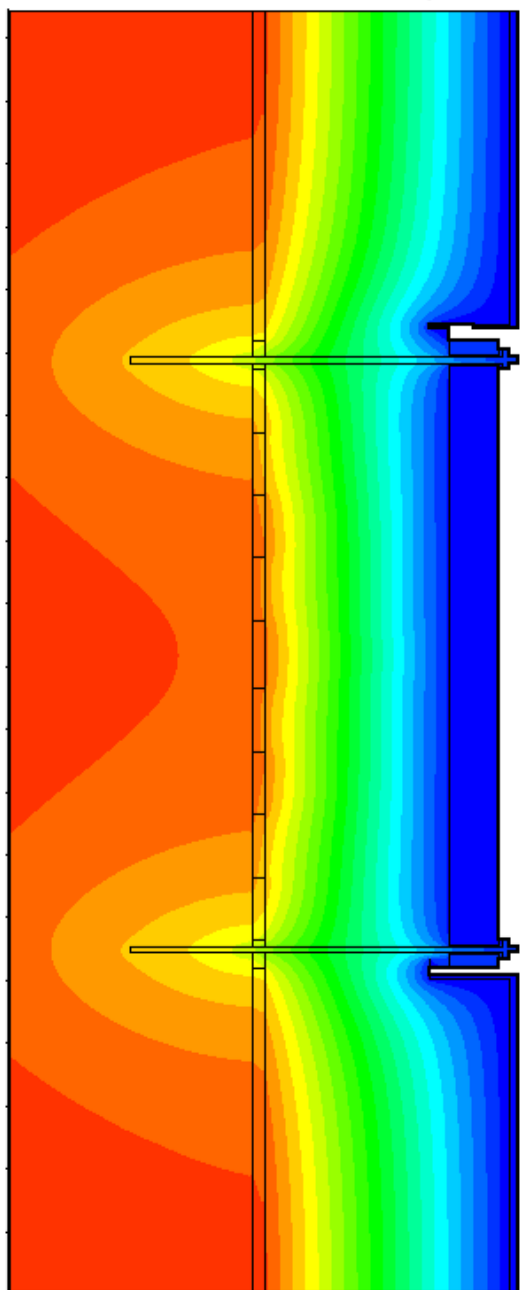
Parameeter		Tähis	Väärtus
Tühijooksu pinge	<i>Open circuit voltage at ref</i>	V _{OC}	48 V
Lühisjooksu voolutugevus	<i>Short circuit current at ref</i>	I _{SC}	1,91 A
Pinge maksimaalse võimsuse korral	<i>Voltage at maximum power point at ref</i>	V _{mpp}	36 V
Voolutugevus maksimaalse võimsuse korral	<i>Current at maximum power point at ref</i>	I _{mpp}	1,66 A
Maksimaalne võimsus	<i>Maximum power</i>	P _{max}	59,8 W
Kiirgus normaaltingimustel	<i>Reference insulation</i>	E _{ref}	1000 W/m ²
Temperatuur normaaltingimustel	<i>Reference temperature</i>	T _{ref}	25°C = 298 K
Väljundvõimsuse temperatuuritegur	<i>Power Temp Coefficient</i>	-	-0,35%/°C
Pinge temperatuuritegur	<i>Voltage Temp Coefficient</i>	-	-58,9mV/°C
Voolutugevuse temperatuuritegur	<i>Current Temp Coefficient</i>	-	2,6mA/°C
Lubatud töötemperatuur	<i>Temperature range</i>	-	-40°C ... 85°C

Lisa 5. Tüüpilised ristlõiked erinevate kinnituslahenduste soojusläbivuse arvutamiseks.

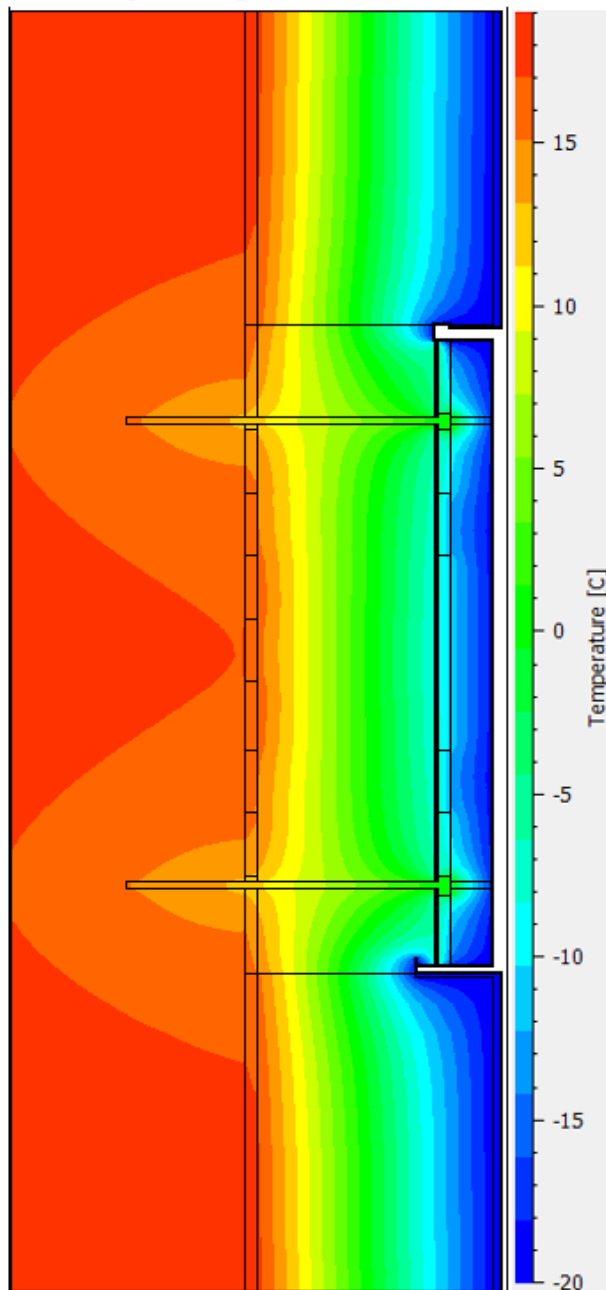


Lisa 6. Poltide katmise mõju seina ristlõike samatemperatuurijoontele.

3. Väliskeskkonnale avatud poldid

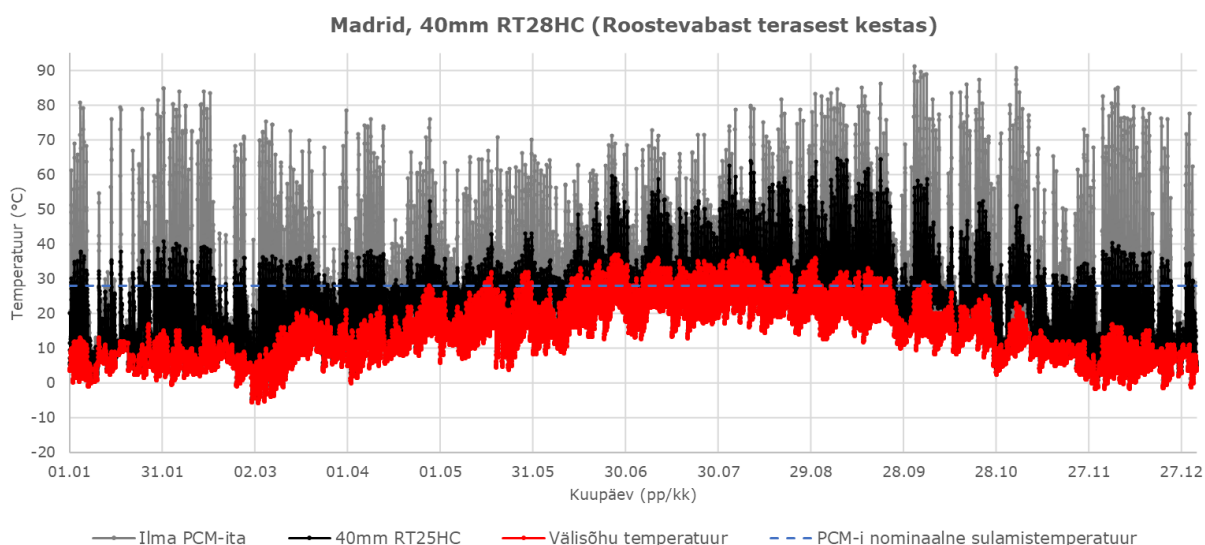
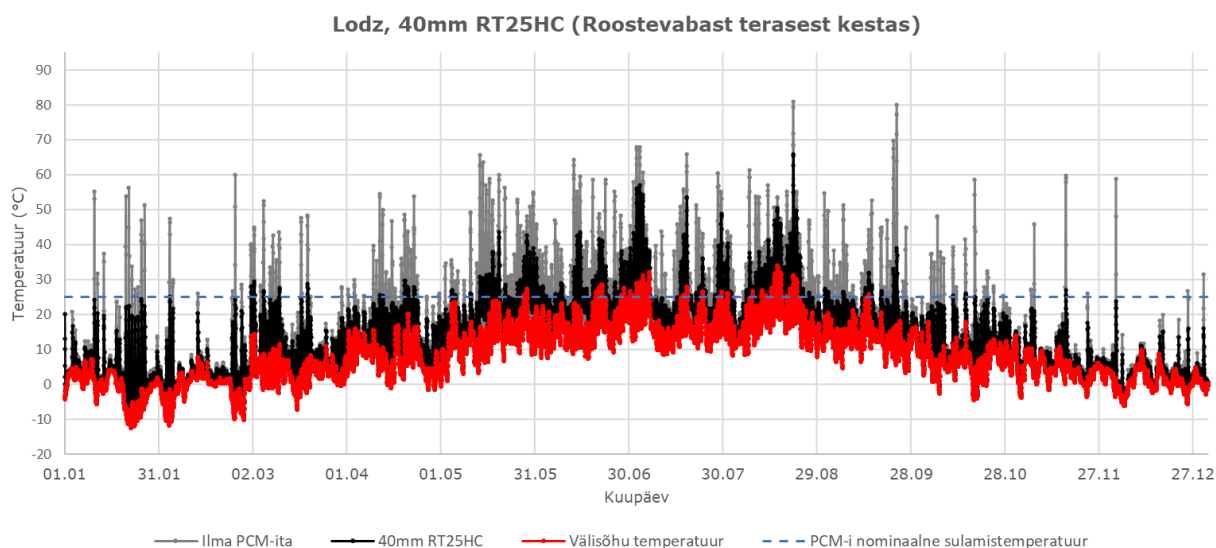
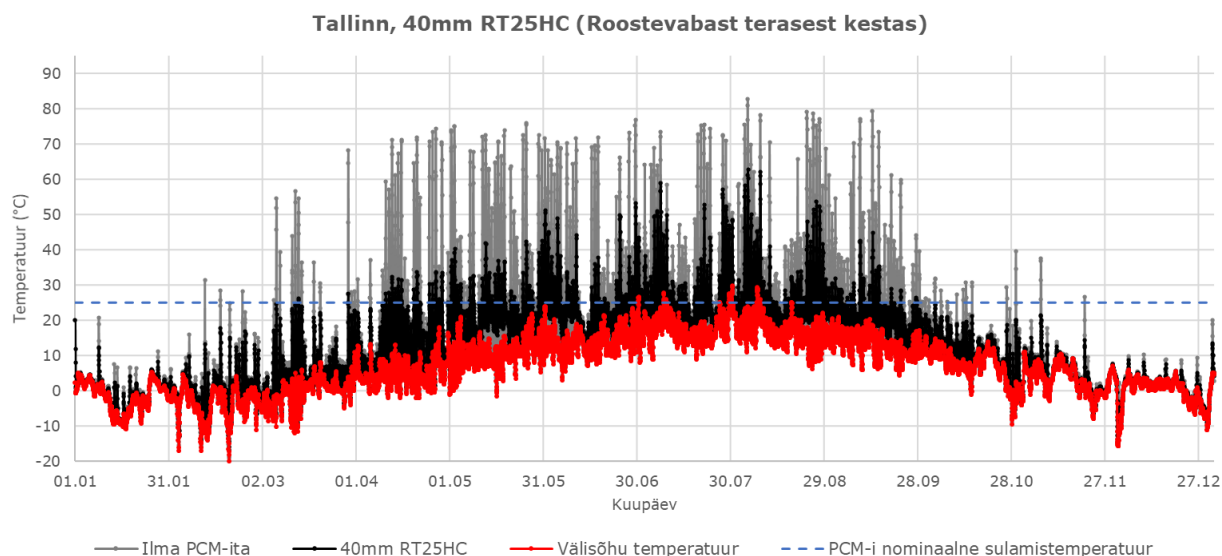


4. Soojustusega kaetud poldid



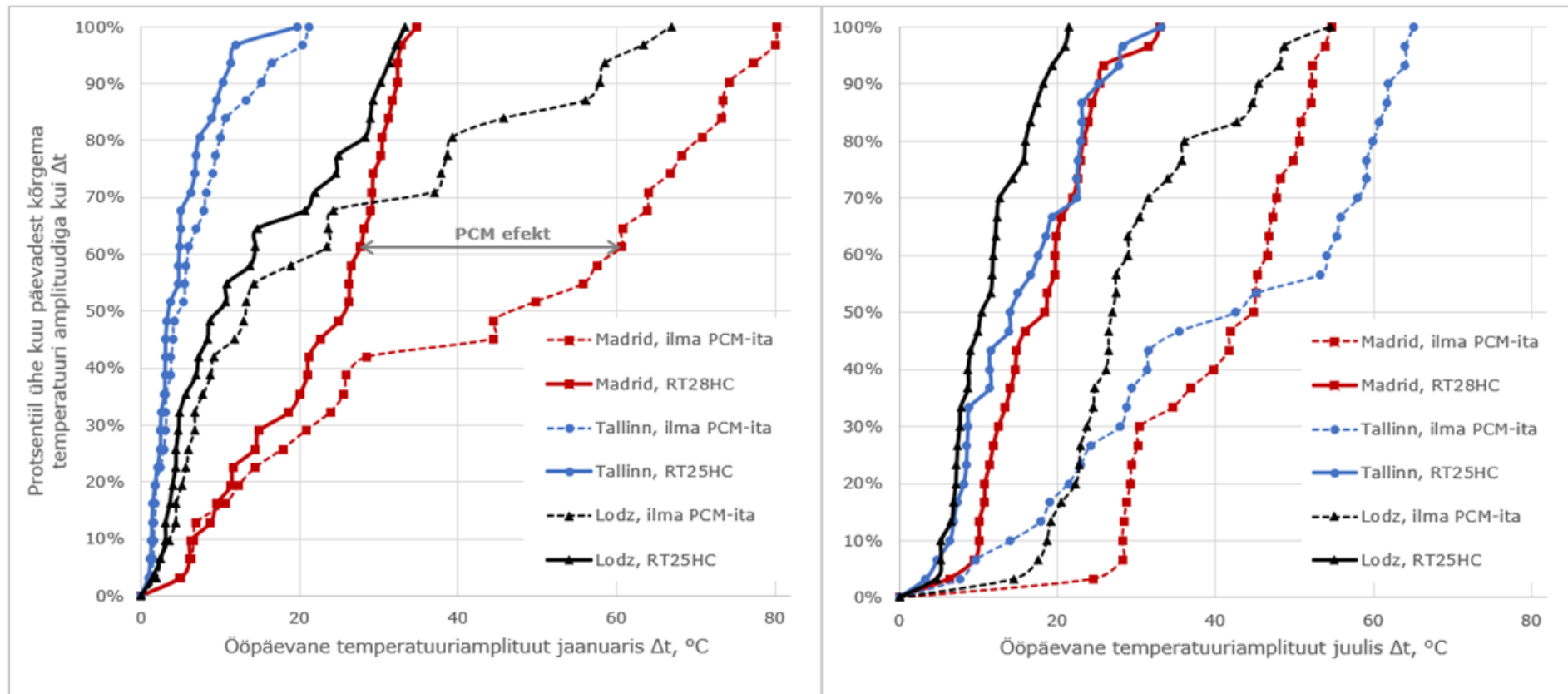
Samatemperatuurid on väljavõtte ristlõike stabiliseerunud olukorrast, kus sisetemperatuur on $+20^{\circ}\text{C}$ ja välistemperatuur $+20^{\circ}\text{C}$. Poltide katmine soojustusega muudab sisepinna temperatuuri mõnevõrra soojemaks. Ristlõike moodustavad materjalid on toodud Lisa 5 joonistel 3.2 ja 4.2.

Lisa 7. PV paneeli tagumise pinna temperatuurid ühe testaasta vältel kolmes asukohas tõhusaima PCM lahenduse juures.

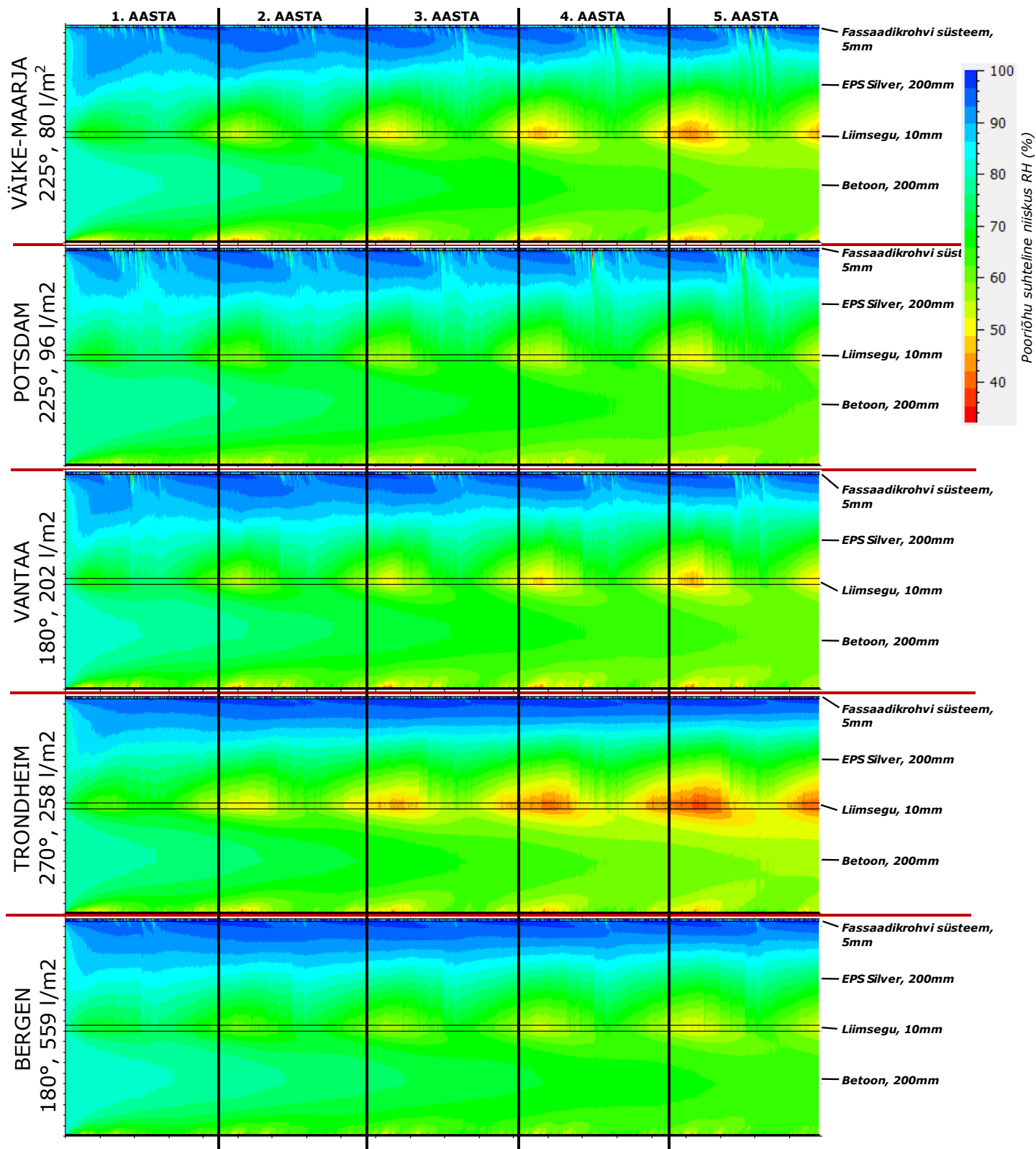


Lisa 8. Faasimuutusmaterjalide mõju ööpäevase PV paneeli temperatuuriamplituudi alanemisele.

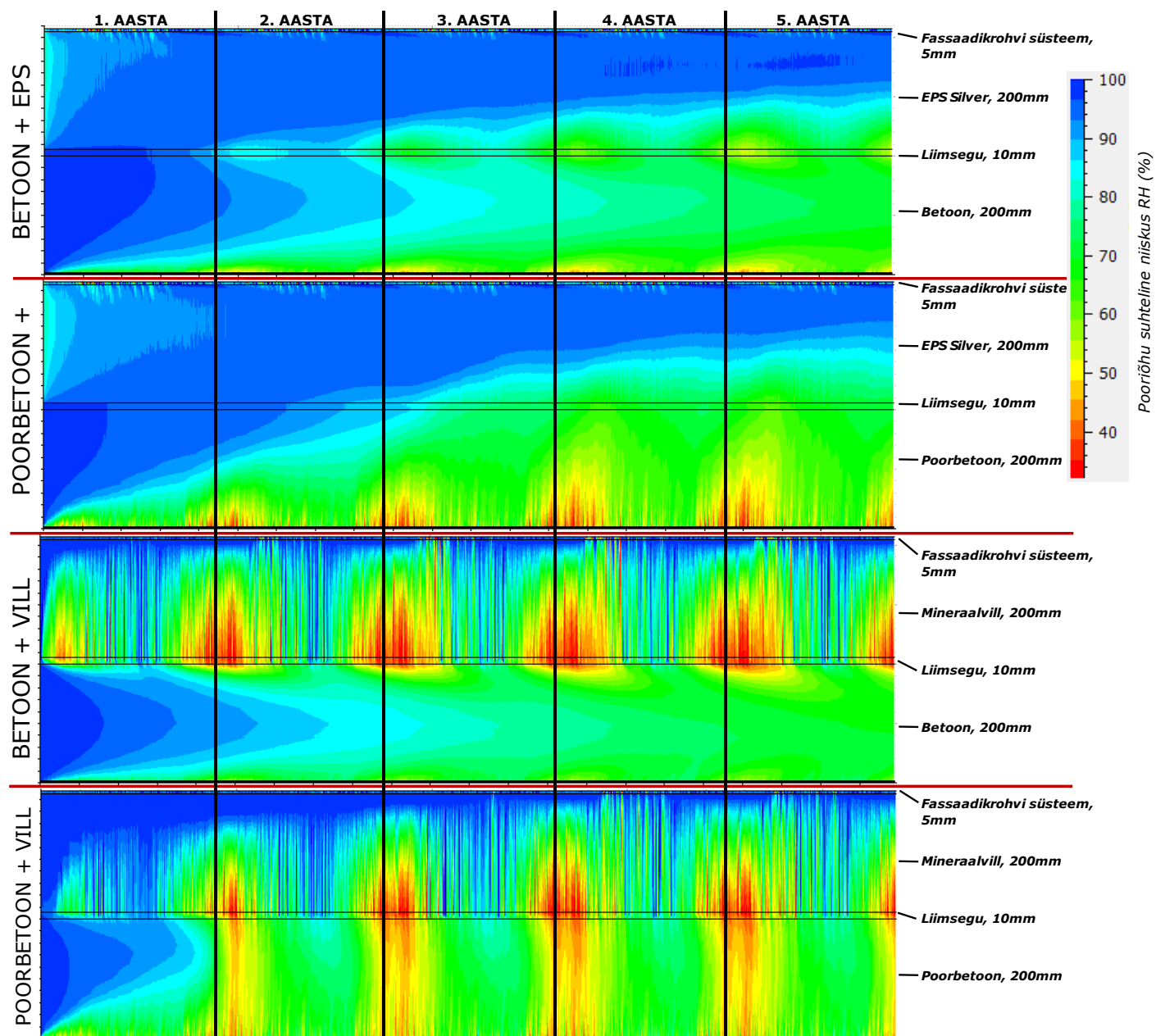
Roostevabast terasest kesta sisse kapseldatud PCM-i mõju kõigis kolmes uuritud kliimas jaanuaris (vasakul) ning juulis (paremal).



Lisa 9. Tavalise SILS fassaadi pooriõhu suhtelised niiskused **uuritavates kliimades väiksemast aastasest kaldvihma** **koormuses suuremani**

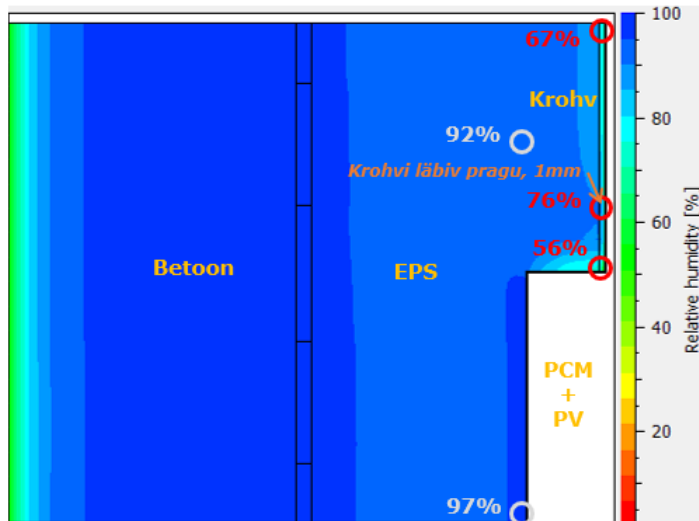


Lisa 10. Erinevate konstruktsiooni- ja soojustusmaterjalide mõju SILS seina niiskusrežiimile viie arvutusaasta jooksul Väike-Maarjas

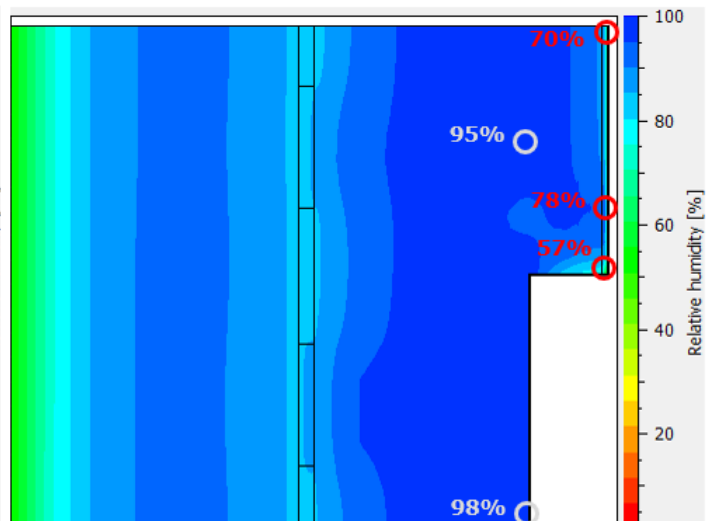


Lisa 11. Metallkesta kapseldatud PCM lahenduse puhul betooni ehitusniiskuse ($0,11 \text{ m}^3/\text{m}^3$) välja kuivamine 4 aasta vältel EPS soojustuse korral.

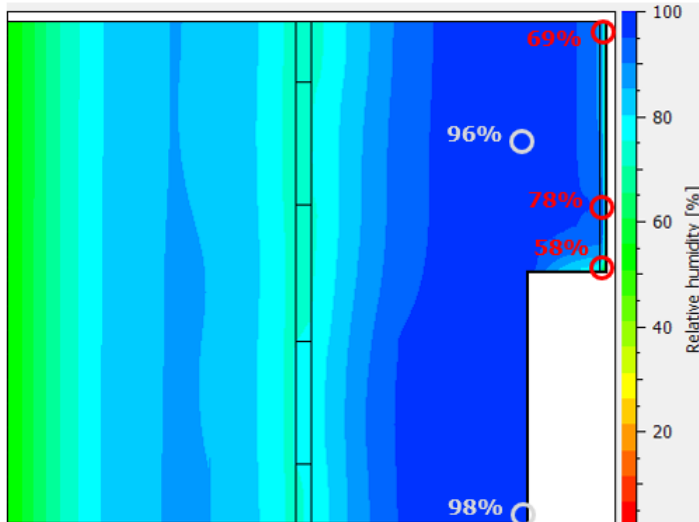
Arvutusaasta 1 8. aprill kell 11:00



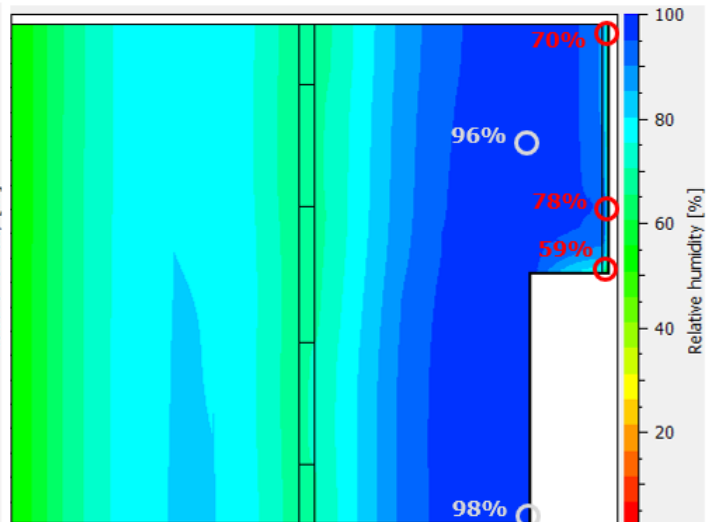
Arvutusaasta 2 8. aprill kell 11:00



Arvutusaasta 3 8. aprill kell 11:00

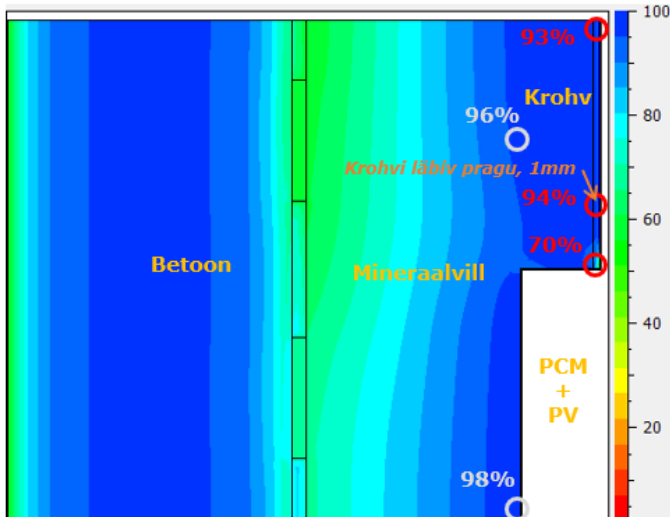


Arvutusaasta 4 8. aprill kell 11:00

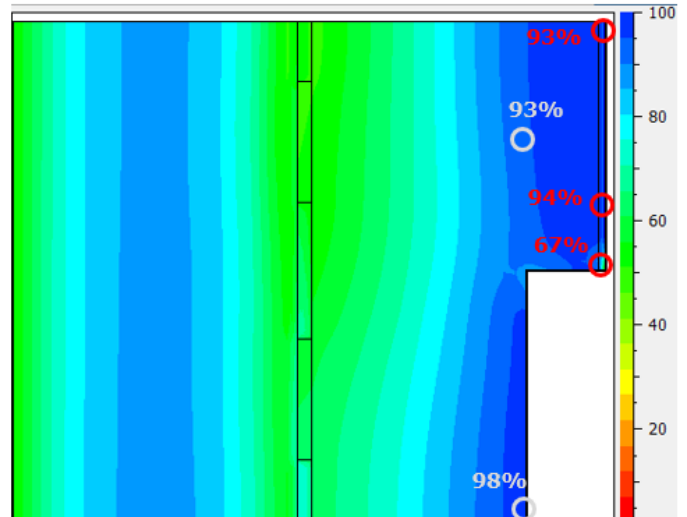


Lisa 12. Metallkesta kapseldatud PCM lahenduse puhul betooni ehitusniiskuse ($0,11 \text{ m}^3/\text{m}^3$) välja kuivamine 4 aasta vältel MINERAALVILLAST soojustuse korral.

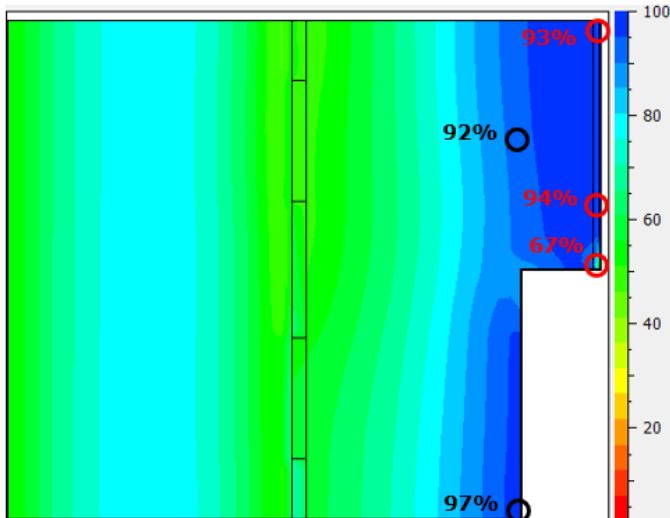
Arvutusaasta 1 8. aprill kell 11:00



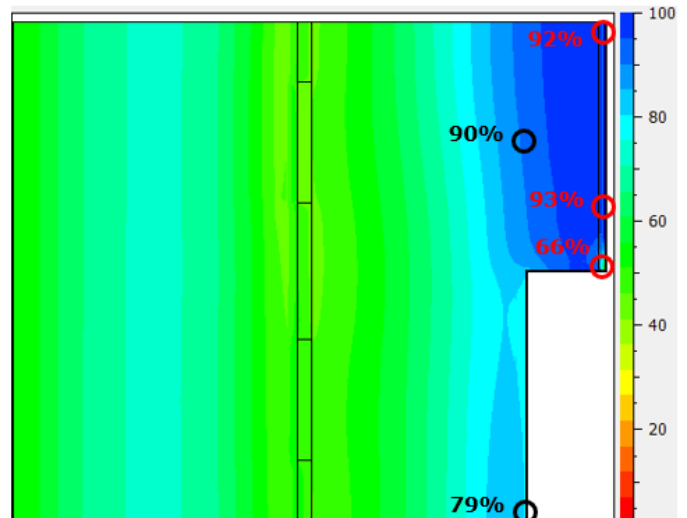
Arvutusaasta 2 8. aprill kell 11:00



Arvutusaasta 3 8. aprill kell 11:00

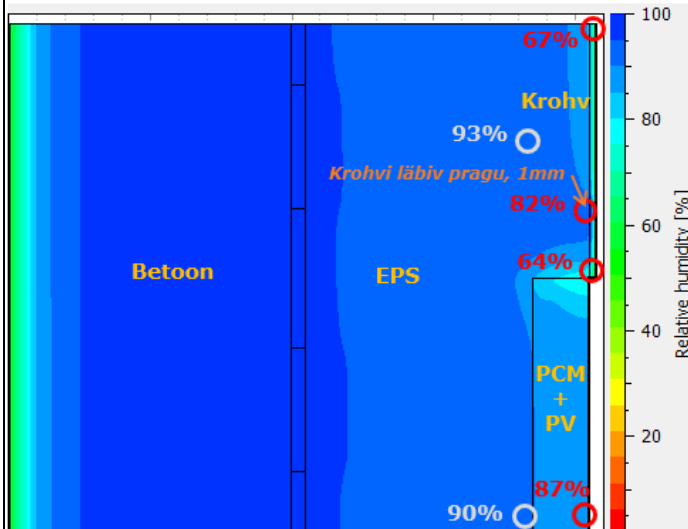


Arvutusaasta 4 8. aprill kell 11:00

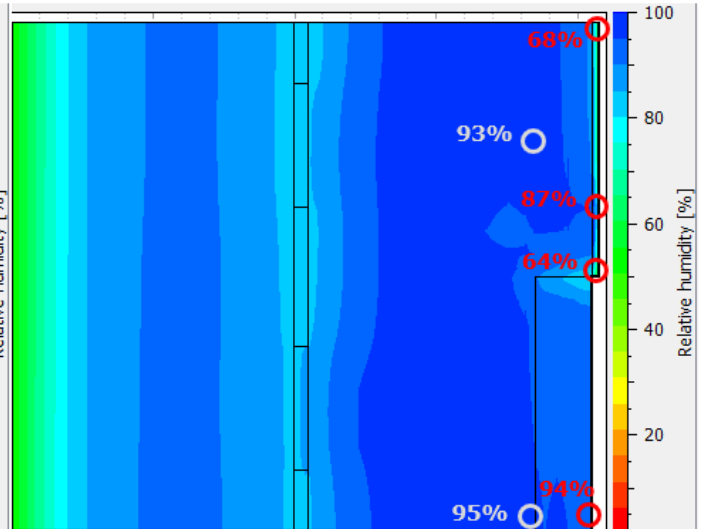


Lisa 13. Krohvi sisse kapseldatud PCM lahenduse puhul betooni ehitusniiskuse ($0,11 \text{ m}^3/\text{m}^3$) välja kuivamine 4 aasta vältel EPS soojustuse korral.

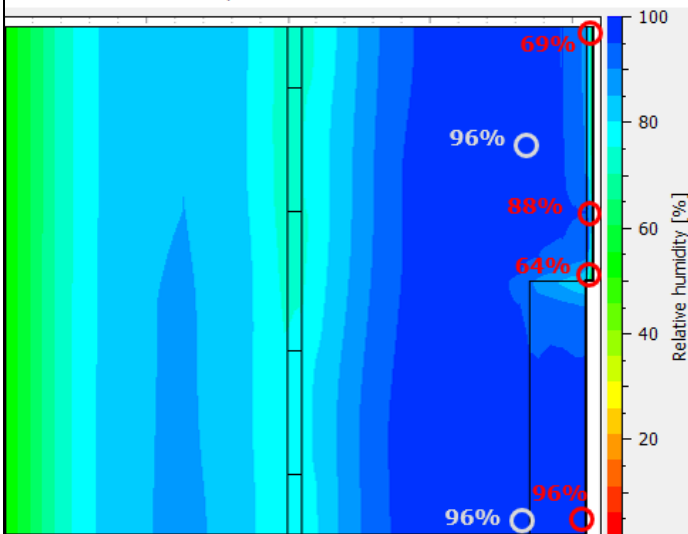
Arvutusaasta 1 8. aprill kell 11:00



Arvutusaasta 2 8. aprill kell 11:00



Arvutusaasta 3 8. aprill kell 11:00



Arvutusaasta 4 8. aprill kell 11:00

